



Caractérisation de la compacité du ballast ferroviaire par méthodes sismiques

Delphine Forissier

► To cite this version:

Delphine Forissier. Caractérisation de la compacité du ballast ferroviaire par méthodes sismiques. Géotechnique. Université Paris-Est, 2015. Français. NNT : 2015PESC1184 . tel-01358369

HAL Id: tel-01358369

<https://theses.hal.science/tel-01358369>

Submitted on 31 Aug 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Thèse présentée pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Paris-Est

Spécialité : Géotechnique

par

Delphine FORISSIER ép. JACQUELINE

École Doctorale : SCIENCES, INGÉNIERIE ET ENVIRONNEMENT

=====
***Caractérisation de la compacité
du ballast ferroviaire
par méthodes sismiques***
=====

Date de soutenance le 17 décembre 2015 devant le jury composé de :

Alain TABBAGH - Université Paris VI	<i>Président</i>
Guy BONNET - Université Paris Est	<i>Rapporteur</i>
Vincent MARTIN - CNRS	<i>Rapporteur</i>
Cyrille FAUCHARD - CEREMA	<i>Co-encadrant</i>
Sofia COSTA D'AGUIAR - SNCF	<i>Examinatrice</i>
Diego MERCERAT - CEREMA	<i>Examineur</i>
Jean-Pierre MAGNAN - IFSTTAR	<i>Directeur de thèse</i>
Jean-François SEMBLAT - IFSTTAR	<i>Co-directeur de thèse</i>
Eric DIMNET - IFSTTAR	<i>Invité</i>

À mes enfants

*"La vie est trop courte pour la passer à regretter
tout ce qu'on n'a pas eu le courage de tenter."¹*

1. Citation de Marie-Claude Bussières-Tremblay, artiste et écrivain

Remerciements

Voilà le moment préféré de chaque étudiant en thèse après plusieurs années d'investissement. Cette rude aventure conduit à avoir une méthodologie et à absorber une charge de travail conséquente. Tout ce qui ne te tue pas te renforce se prête bien à ce contexte. Néanmoins, sans le soutien et la contribution de nombreuses personnes, ce travail ne serait pas aussi abouti.

Je tiens en premier lieu à remercier **Richard Lagabriele** de l'IFSTTAR pour avoir été l'élément déclencheur de cet engagement au cours d'une évaluation par le comité César. Le propos était : "Vous êtes jeune, si vous voulez être évaluée, faites une thèse"... Cette idée avait néanmoins été soulevée à mon arrivée au Centre d'Expérimentation et de Recherche en 2002.

Je tiens à remercier mes directeurs (**Jean-Pierre Magnan** et **Jean-François Semblat**) qui ont acceptés la direction de cette thèse. Ils ont su donner l'orientation des grandes étapes essentielles à l'élaboration de ce travail.

Mes remerciements se portent ensuite vers mon encadrant, **Cyrille Fauchard** qui a été présent et qui m'a toujours soutenue. Ses compétences scientifiques m'ont beaucoup aidées. Rapidement, il savait me transmettre les connaissances nécessaires.

Je le remercie ainsi que ses proches collègues (**Raphael Antoine**, **Bruno Beaucamp** et **Vincent Guilbert**) pour leurs conseils et leurs disponibilités.

Je tiens sincèrement à remercier les membres de mon jury de thèse qui se sont investis dans cette mission et en particulier **Alain Tabbagh**, président du jury qui m'a décerné le titre de docteur, après avoir été un de mes anciens professeurs à l'université Paris VI (15 ans auparavant), mes deux rapporteurs **Vincent Martin** et **Guy Bonnet** pour leur relecture active et leur pertinence de jugement, **Diego Mercerat** pour son regard très scientifique et son aide sur les mesures de bruit de fond sismique et enfin **Sofia Costa D'Aguiar** pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

Toute ma gratitude va ensuite à mes collègues du Centre d'Expérimentation et de Recherche pour leur soutien, leur bonne humeur et leur investissement dans la réalisation des expérimentations (en particulier **Gaelle Benoit** pour son aide sur LaTeX et ses conseils de doctorante, mon collègue préféré **Gratien Vincelas**, pour son expérience professionnelle et humaine, **Dimitri Mercadier**, **Bertrand Fanise**, **Karim El Dabi**, **Carl Calmo**, **Christophe Piquet**, **Michel Neveu** et **Thibault Meslé** pour leur implication). L'ambiance fertile de cette structure m'a permis d'avoir des moments agréables essentiels pour tenir le coup lors d'états de fatigue avancés.

Un grand merci à **Thierry Sedran**, responsable de l'opération de recherche VIF au sein de l'IFSTTAR pour sa contribution financière.

Je transmets toute mon admiration et mes remerciements à **Jean-Jacques Leblond**, expert vibration du réseau des laboratoires ainsi qu'à **Luca Lenti** pour avoir participé au financement dans la dernière année de thèse au travers de l'opération VIBREN.

Un merci sincère à **Anne-Marie Duval** pour son soutien moral et son dynamisme pour raviver la flamme dans la phase finale de ce projet.

Je tiens également à remercier l'équipe Géophysique de l'IFSTTAR et en particulier, **Philippe Cote**, **Mathieu Lefeuvre** et **Anaëlle Joubert** pour m'avoir accompagnée, lors des premiers essais, avec leur moyen d'essais.

Un grand merci à **Éric Dimnet** et **Sahar Hemmati** de l'IFSTTAR pour avoir réalisé la modélisation discrète du ballast.

Que dire à **Fabien Chiappini** de l'IFSTTAR, si ce n'est "MERCI", pour m'avoir aidée à mettre en œuvre le logiciel César.

Merci à **Cécile Cornou** de l'ISTerre pour sa grande disponibilité et sa simplicité. Par la même, je tiens à remercier son collègue, **Marc Wathelet**, pour la mise à disposition de son logiciel de traitement des ondes de surface.

Je remercie **Christophe Heinekelé** pour son aide sur l'analyse des corrélations.

Je tiens à remercier tous les agents administratifs qui m'ont facilité les démarches tout au long de ma thèse (**Martine Lannic**, **Isabelle Roussel** et **Michael Francois** de la DTer-NC (CEREMA), **Cécile Blanchemanche** de l'école doctorale SIE et **Jean-Luc Clément** de l'IFSTTAR).

Merci à mon petit père des Antilles, **Christophe Grout** qui a cru en moi depuis bientôt 20 ans et qui par sa sagesse éternelle a toujours été d'un grand réconfort.

Pour terminer, je ne remercierai jamais assez ma famille proche :

- mon mari **Jean-Marc Jacqueline** qui malgré sa réticence au départ, a su me soutenir profondément dans les moments les plus critiques. J'ai ainsi pris la mesure de son amour et de sa qualité d'époux,
- mes trois enfants, **Clarys**, **Rémi** et **Julia** pour m'avoir obligée de sortir la tête de l'eau pendant les week-ends.
Avec leur mot simple, ils cherchaient à m'encourager pour finir ce travail "Maman c'est quand que tu termines ta thèse!",
- et enfin mon grand père, **Louis Digonnet**, un homme remarquable qui m'a transmis sa force mentale pour le travail. Décédé cette année 2015, il aurait été fier de sa petite fille.

Résumé

Les voies ferrées, construites pour la plupart depuis plus d'une centaine d'années, sont des ouvrages vieillissants. Elles nécessitent une maintenance et un entretien accrus, ce qui constitue un enjeu technique et économique majeur pour les années à venir. Jusqu'à l'ouverture des marchés à la concurrence, la mise en œuvre des voies nouvelles était vérifiée empiriquement par la SNCF. Du fait de la mise en œuvre de la directive européenne 91/440/10, l'exploitant historique se tourne d'un objectif de moyen vers un objectif de résultat. Cela nécessite donc de disposer de méthodes d'auscultation non destructives, permettant de vérifier que le compactage du ballast est correctement réalisé, avant de faire circuler le trafic voyageurs, en vue de garantir un niveau de sécurité élevé. Cette première approche pourrait être poursuivie pour assurer une auscultation à grand rendement. Cependant, les méthodes existantes permettant d'obtenir l'état de compactage du ballast à la mise en œuvre sont ponctuelles et difficiles à mettre en place ; elles ne répondent pas à la problématique de doublement de la maintenance des voies des prochaines années.

L'étude de la propagation d'ondes vibratoires dans le ballast est une alternative à ces méthodes qui peut permettre de répondre à ces contraintes.

Le ballast est un milieu discontinu complexe pour la compréhension des ondes car elles se propagent dans un chaînon de force. Il présente une grande difficulté dans la modélisation du fait de la taille élevée des éléments et doit être traité comme un milieu discret ne répondant pas à une mécanique élastique de milieu continu. Étant donné la difficulté de modéliser cette couche discrète, il convient de traiter le problème par l'expérimentation.

L'objectif de cette thèse est donc d'orienter la recherche vers l'utilisation de la propagation des ondes vibratoires dans la structure de la voie.

Ce mémoire est organisé comme suit :

- Un premier chapitre détaille la structure de la voie ferrée et le matériau granulaire qu'est le ballast, ainsi que les méthodes de diagnostic des voies ferrées existantes.
- Le deuxième chapitre décrit les différents types d'ondes vibratoires se propageant dans un milieu élastique homogène, puis dans le ballast, et étudie la réponse du ballast à travers celle de la traverse ferroviaire.
- Ces deux chapitres, issus de l'état de l'art, permettent de définir, dans le chapitre trois, les expérimentations réalisées dans le cadre de ce travail sur une structure ferroviaire en vraie grandeur : mise en œuvre, instrumentation, résultats. Ce chapitre s'attache particulièrement à décrire la vitesse des ondes et leur amortissement dans le ballast, les courbes de dispersion mesurées.
- Enfin, la propagation d'une onde vibratoire dans le ballast est étudiée dans le chapitre quatre par le biais d'une simulation numérique, en comparant l'expérimentation à deux modélisations discrètes et continue.

MOTS-CLÉS : Voie ferrée - ballast - expérimentation échelle 1 - propagation - méthodes sismiques - onde de surface - méthode aux éléments finis - modélisation discrète

Abstract

Railways, most of them built for over one hundred years, are old structures. They require increasing maintenance, a major technical and economic challenge for the coming years.

Until the opening of markets to competition, the implementation of new railroads was empirically controlled by SNCF. Because of the application of the European directive 91/440/10, the historical operator turns from a goal of means to a goal of results. This calls for non-destructive highly efficient auscultation methods to check the right compaction of the ballast. However, existing methods for obtain ballast compaction assessment during implementation stage are surface-limited and difficult to apply ; they do not respond to the issue of the doubling of track maintenance. Thus the study of the propagation waves in the ballast is an alternative to these methods and may allow to answer these requirements.

The ballast is a discontinuous medium, complex for the understanding of waves, as they propagate in a force link. Modelling ballast is especially difficult because of the large size of its components and because it should be treated as a discrete environment, not following the elastic mechanics of continuous media. Given the difficulty to model this discrete layer, it is necessary to undertake the problem with experimentation. The aim of this thesis is to focus on the use of the propagation of vibration waves in the railroad structure.

This work is organized as follows :

- The first chapter details the structure of the railroad and the ballast as a granular material, and the existing assessment methods for railroad.
- The second chapter describes the different types of vibration waves that propagate, first, in an elastic homogeneous medium, second in the ballast, and presents the answer of ballast through the answer of the sleeper.
- The two previous chapters, derived from the state of the art, allow to define in chapter three the experiments implemented as part of this work on a full scale railroad structure : realization, instrumentation, results. This chapter especially endeavours to describe the waves celerity, their damping in ballast and the measured dispersion curves.
- Finally, the propagation of a vibration wave in the ballast is studied in chapter four and a numerical simulation, compares with a discrete model and a continuous model with experimental results.

KEYWORDS : Railroad tracks - ballast - full scale experiment - propagation - seismic methods - surface waves - finite element method - discrete modeling

Table des matières

1	La voie ferrée et le ballast	5
1.1	La voie ferrée	5
1.1.1	Introduction	5
1.1.2	Le rail	6
1.1.3	Les attaches et la semelle	8
1.1.4	La traverse	8
1.1.5	Le ballast	9
1.1.6	La sous-couche	9
1.1.7	La plate-forme	10
1.2	Le Ballast : caractéristiques et méthodes d'auscultation	10
1.2.1	Généralités	10
1.2.2	Granulométrie	12
1.2.3	Forme	14
1.2.4	Propreté et constante diélectrique	14
1.2.5	Résistance mécanique	19
1.2.6	Raideur	20
1.2.7	Module d'Young	20
1.2.8	Amortissement	20
1.2.9	Porosité, compacité	21
1.3	Sollicitations et répartition des charges ferroviaires	23
1.4	Méthodes d'inspection des voies ferrées	25
1.5	Méthodes d'auscultation par propagation d'ondes	26
1.5.1	Relation vitesse-porosité et autres paramètres	26
1.5.2	Propagation à travers le ballast	27
1.5.3	Propagation à travers la structure de la voie ferrée	28
1.5.4	Étude du ballast avec la réponse de la traverse	29
1.5.5	Modélisation du ballast	29
1.5.6	Propagation acoustique	29
1.5.7	Écoulements granulaires	30
1.6	Conclusion	30
2	Auscultation par méthodes sismiques	33
2.1	Introduction	33
2.2	Ondes de volume - milieu élastique infini homogène isotrope	34
2.2.1	Généralités	34
2.2.2	Réfraction des ondes	38
2.3	Ondes de Rayleigh - milieu élastique semi-infini, homogène et hétérogène, isotrope	40
2.3.1	Généralités sur les ondes de surface	40
2.3.2	Polarisation	41

2.3.3	Énergie des ondes de Rayleigh	41
2.3.4	Équation des ondes de Rayleigh	42
2.3.5	Dispersion des ondes - milieu semi infini, élastique hétérogène	43
2.3.6	Vitesse de groupe - Vitesse de phase	45
2.3.7	Protocole de mesure	47
2.3.8	Traitement	49
2.3.9	Développement futur de cette méthode	52
2.4	Amortissement des ondes	53
2.5	Conclusion	55
3	Expérimentations pour l'étude du ballast	57
3.1	Introduction	57
3.2	Instrumentation sismique de la structure expérimentale	58
3.2.1	Introduction	58
3.2.2	Choix des fréquences et des sources	58
3.2.3	Choix des capteurs	61
3.2.4	Choix du dispositif de mesure sismique : méthode MASW	67
3.2.5	Choix du dispositif de mesure H/V	68
3.3	Résultats des mesures sismiques	71
3.3.1	Synthèse des résultats de mesures sismiques	72
3.3.2	Rapport signal sur bruit	73
3.3.3	Vitesse des ondes - hodochrone	74
3.3.4	Épaisseur des couches - compacité	84
3.3.5	Amortissement des ondes	87
3.3.6	Ondes de surface - courbe de dispersion	99
3.4	Synthèse des résultats	107
3.5	Conclusion	111
4	Simulation d'une couche de ballast	113
4.1	Introduction	113
4.2	État de l'art sur la modélisation du ballast	115
4.2.1	Modélisation continue	115
4.2.2	Modélisation discrète	125
4.3	Essais de référence	131
4.3.1	Présentation de l'expérimentation	131
4.3.2	Résultats des essais de validation	134
4.4	Modélisation du plot expérimental par éléments finis	143
4.4.1	Paramètres de la modélisation continue du ballast	143
4.4.2	Résultats de la modélisation en mécanique des milieux continus	150
4.5	Simulation discrète du plot expérimental	153
4.5.1	Méthode de calcul	153
4.5.2	Résultats de la simulation discrète	160
4.5.3	Comparaison simulation discrète/continue	162

Table des matières

4.6	Récapitulatif	163
4.6.1	Contexte	163
4.6.2	Résultats expérimentation	163
4.6.3	Simulation continue	165
4.6.4	Simulation discrète et comparaison avec la modélisation continue et l'ex- périmentation	165
4.7	Conclusion	166
Conclusion et perspectives		169
A Compléments sur les notions fondamentales		173
A.1	Défauts géométriques	173
A.1.1	Matériel d'auscultation pour les lignes classiques	173
A.1.2	Matériel d'auscultation pour les lignes à grande vitesse	175
A.2	Véhicule mesurant les paramètres de raideur déflexion	175
A.2.1	Défectométrie de la voie (HSD)	176
A.3	Épaisseur de la voie	177
A.4	Densité en place	179
A.4.1	Gammadensimètre	179
A.4.2	GDS200	180
A.4.3	Densitomètre poids / volume	180
A.4.4	Pénétromètres dynamiques	181
A.5	Défaut de la voie par l'essai d'excitation au marteau (HET)	183
A.6	Maintenance du ballast	186
A.6.1	Bourrage mécanique du ballast	186
A.6.2	Soufflage pneumatique du ballast (stoneblower)	189
A.6.3	Renouvellement du ballast	190
A.7	Comportement du ballast en laboratoire	193
A.7.1	Essai de vibration	193
A.7.2	Lois de tassement - Déformation permanente et élastique	194
B Compléments sur l'expérimentation		199
B.1	Description des structures expérimentales mises en œuvre	199
B.1.1	Planches 1 et 2	199
B.1.2	Planche 3	201
B.1.3	Planche 4	201
B.1.4	Caractéristiques des matériaux	202
B.1.5	Compactage des planches	206
B.1.6	Mesures à la mise en œuvre - planches 1 et 2	208
B.2	Inventaire des caractéristiques des capteurs de l'expérimentation	217
B.3	Étalonnage des capteurs en amplitude et phase	221
B.3.1	Objectif	221
B.3.2	Description du matériel	221

Table des matières

B.3.3	Méthodes de mesure	223
B.3.4	Résultats obtenus	224
B.4	Courbes d'arrivée des ondes - variation épaisseur/compacité du ballast	225
B.5	Traitement des vibrateurs par corrélation	228
B.6	Méthodes H sur V évènement et H sur V bruit de fond	230
B.6.1	Résultats des fonctions récepteurs ou H sur V évènement	230
B.6.2	Résultats des mesures de bruit de fond sismique	234
B.6.3	Crosscorrélation	234
C	Compléments sur la modélisation	237
C.1	Quelques résultats expérimentaux du plot restreint de ballast - hauteur de chute de 30 cm - plaque posée	237
C.2	Paramètres de la modélisation	239
C.3	Calculs complémentaires par éléments finis	240
	Bibliographie	243

Table des figures

1	Schéma de principe des dispositifs étudiés sur ballast et sous-couche	2
2	Zone d'intérêt de l'état de serrage du ballast ferroviaire	3
1.1	Profil d'une structure de voie classique (Kouroussis, 2009)	6
1.2	Différents types de rail (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Types_de_rails2.svg?uselang=fr), de gauche à droite, type UIC 60, type Vignole, type Broca ou à gorge, type double champignon symétrique, et asymétrique	7
1.3	Composants de l'armement d'une voie ferrée, https://fr.wikipedia.org/wiki/Fixation_des_rails_aux_traverses	7
1.4	Fuseaux granulométriques du ballast ferroviaire (Afnor, 2003)	13
1.5	Différentes sources de pollution du ballast (Selig & Waters, 1994)	15
1.6	Effet du colmatage du ballast sur la fréquence des cycles de bourrage	16
1.7	Érosion hydraulique de la traverse	16
1.8	Courbes granulométriques représentatives d'un ballast propre à pollué avec un indice de colmatage F_I variant de 3 à 45 (Selig & Waters, 1994)	17
1.9	Essai de densité in situ du ballast Selig & Waters (1994)	22
1.10	Essai de chargement à la plaque Selig & Waters (1994)	22
1.11	Essai de poussée latérale sur la traverse Selig & Waters (1994)	23
1.12	Forme et fréquences des sollicitations au passage d'un TGV	24
1.13	Répartition statique théorique de la reprise de charges par les traverses Schmitt et al. (2006)	24
2.1	Propagation d'ondes de compression (ondes P)	35
2.2	Propagation d'ondes de cisaillement (ondes S)	35
2.3	Propagation des ondes sismiques dans le sol - Mari et al. (1997)	37
2.4	Réfraction totale des ondes (Magnin & Bertrand, 2005) - Schéma de principe,	39
2.5	Propagation des ondes de surface, Mari et al. (1997) $t_x = \frac{x}{V_R}$ avec $V_R = \frac{\delta x}{\delta t}$	40
2.6	Schéma représentant la propagation des ondes de Rayleigh	41
2.7	Profil de déformation et de pénétration des ondes de Rayleigh en fonction de la longueur d'onde, Foti (2000)	42
2.8	Profil de vitesse dans le cas d'un milieu élastique semi infini homogène, graphe inspiré de Bodet (2005)	44
2.9	Profils de vitesse dans le cas d'un milieu élastique semi infini hétérogène, Bodet (2005)	44
2.10	Courbes de dispersion des différents modes de Rayleigh	45
2.11	(a) Vitesse de groupe U et de phase (b) Arrivée des ondes dispersives pour différents géophones, Sheriff & Geldart (1995)	46
2.12	Interprétation de graphes issues de mesures sismique en onde de surface (Park et al., 2001)	50
2.13	Interpolation des vitesses de cisaillement sur un modèle 2D (Park et al., 2007)	52

2.14 Mesures automatisées d'onde de surface au moyen d'un prototype KGS (Park et al., 2007)	53
2.15 Amortissement géométrique - Distribution des déplacements des ondes générées par une source ponctuelle à la surface d'un demi-espace homogène et isotrope - Woods (1968)	54
3.1 Schéma synthétique de l'expérimentation	58
3.2 Instrumentation sismique de la structure ferroviaire (planches 1 et 2)	59
3.3 Auscultation et longueur d'onde	59
3.4 Sources faiblement énergétiques sans panneau de voie	61
3.5 Instrumentation du support de l'impactant du marteau et de la chute de masse	62
3.6 Instrumentation des sources marteau/chute de masse avec un géophone - planche 3	63
3.7 Méthodes de fixation des géophones	64
3.8 Modes de fixation des accéléromètres sur les granulats de ballast et chargement statique au moyen de sacs de sable	64
3.9 Instrumentation à la surface du ballast - planche 2	65
3.10 Accéléromètres dans le ballast - planche 2	65
3.11 Accéléromètres positionnés au milieu de la sous-couche - planche 2	66
3.12 Instrumentation en dehors de la planche 2 à une distance connue du pied du remblai	66
3.13 Vue transversale de la planche 2, plot compacté, dans l'axe des capteurs hors de l'emprise du remblai	67
3.14 Schéma des paramètres du dispositif sismique	68
3.15 Exemple d'enregistrement sismique	71
3.16 Rapport signal sur bruit - planche 3 - marteau V - offset de 25 cm	73
3.17 Exemple d'hodochrone	74
3.18 Schéma de principe de la propagation des ondes dans un bicouche	75
3.19 Vitesse de propagation des ondes P directes dans le ballast (30, 60, 90 cm planche 2 et 80 cm planche 3), dans le sable (30 cm - planche 4), dans la sous-couche (17 cm -planche 3) - Marteau vertical	76
3.20 Vitesse de propagation des ondes P réfractées dans le ballast (30, 60, 90 cm planche 2 et 80 cm planche 3), dans le sable (30 cm - planche 4), dans la sous-couche (17 cm -planche 3) - Marteau vertical	77
3.21 Masse volumique mesurée à la GDS200	77
3.22 Suivant théorie, réfraction interface ballast / sous-couche	78
3.23 Hypothèse, réfraction sur zone de compactage dans ballast	78
3.24 Vitesse de propagation des ondes dans 30 cm de ballast - Planche 2 - Offset 25 cm	79
3.25 Vitesse de propagation des ondes dans 60 cm de ballast - Planche 2 - Offset 25 cm	80
3.26 Vitesse de propagation des ondes dans 80 cm de ballast - Planche 3 - Offset 25 cm	80
3.27 Vitesse de propagation des ondes dans 90 cm de ballast - Planche 2 - Offset 25 cm	81
3.28 Vitesse de propagation des ondes dans 30 cm de sable - Planche 4 - Offset 25 cm	82
3.29 Dispositif sismique de la sous-couche ferroviaire - planche 3	83

Table des figures

3.30	Vitesse de propagation des ondes dans 17 cm de sous-couche ferroviaire en GNT - Planche 3 - Offset 25 cm	84
3.31	Exemple d'hodochrone pour le calcul de l'intercept et de la distance critique	85
3.32	Comparaison des épaisseurs calculées suivant les lois de Snell-Descartes et des épaisseurs mises en œuvre	86
3.33	Schéma de la mesure de l'amortissement des ondes	87
3.34	Décroissance d'amplitude des ondes dans le ballast et le sable - Marteau vertical (plot foisonné en pointillé et plot compacté en trait plein)	88
3.35	Schéma de l'implantation des capteurs dans 90 cm de ballast (vues de dessus à gauche et vues en élévation à droite)	89
3.36	Accélérations normalisées à la source dans 60 et 90 cm de ballast - Marteau vertical - Offset 25 cm - Axe V	90
3.37	Accélérations normalisées à la source mesurées dans la sous-couche - Marteau vertical - planche 2	91
3.38	Accélérations normalisées à la source mesurées dans la sous-couche - chute de masse - planche 2	92
3.39	Comparaison des spectres de vitesse avec deux modes de fixation de géophones (posés et scellés) Planche 1 - Marteau V - Offset de 25 cm	93
3.40	Exemple de spectre normé avec les trois axes VLT - Marteau V - Offset de 25 cm - géophones posés	94
3.41	Exemple de spectre normé avec les trois axes VLT - Marteau V - Offset de 25 cm - géophones scellés	94
3.42	Comparaison des spectres de vitesse du Marteau V - Planche 4 - 30 cm de sable - Offset de 55 cm	95
3.43	Comparaison des spectres de vitesse des différentes sources - Planche 2 - 30 cm de ballast - Offset de 25 cm - Spectre de vitesse de 8 des 24 géophones (à gauche) - Vue de dessus du spectre de vitesse (à droite)	96
3.44	Comparaison de différentes sources - Planche 2 - 30 cm de ballast - Offset de 25 cm - Spectre de vitesse normalisée (à gauche) - Fréquences maximales (à droite)	97
3.45	Courbe de dispersion théorique dans 30 cm de ballast et 30 cm de sable et limites d'interprétation	100
3.46	Détermination des limites du modèle - bande de fréquences et longueurs d'onde mini et maxi	101
3.47	Diagrammes de dispersion obtenus avec un même essai - Vibreur inertiel - ballast foisonné - offset de 48 cm	102
3.48	Diagrammes de dispersion expérimentaux de la planche 1 sur 30 cm de ballast à partir de 16 géophones sur 24 - Offset 1,15 m	103
3.49	Diagrammes de dispersion expérimentaux de la planche 1 sur 30 cm de ballast à partir de 24 géophones - offset 25 cm	103
3.50	Comparaison des courbes de dispersion théoriques et expérimentales - planche 2 avec 30 cm de ballast et planche 4	104
3.51	Courbes de dispersion expérimentales de la planche 4 dans 30 cm de sable compacté	105

3.52	Courbe de dispersion expérimentales de la planche 1 sur 30 cm de ballast à partir de 16 géophones sur 24 - Offset 1,3 m	105
3.53	Moyenne des courbes de dispersion expérimentales de la planche 3 sur 80 cm de ballast - 24 géophones monoaxiaux - Offset 25 cm	106
4.1	Module d'élasticité en fonction de la profondeur - Exemple de simulation 2D axisymétrique non-linéaire d'une couche de chaussée en grave non traitée avec le modèle de Boyce (CESAR-CVCR) - SaintLaurent (2008)	114
4.2	Volume élémentaire représentatif - modèle continu	115
4.3	Schéma du modèle discret / continu décrit par Ricci et al. (2005)	116
4.4	Lois de comportement et évolution du module E avec la déformation ε (Nguyen, 2008)	117
4.5	Divers modèles rhéologiques : expressions des modules complexes $M(\omega)$ et des courbes d'amortissement correspondantes Q^{-1} (Semblat & Pecker, 2009)	118
4.6	Divers maillages de modèles numériques de propagation d'ondes sismiques (Semblat, 2008)	122
4.7	Simulation numérique des chaînes de forces d'un empilement de billes de verre soumis à une contrainte statique (Makse et al., 2000)	126
4.8	Différentes méthodes de modélisation numérique discrète (sur l'exemple de sphères)	128
4.9	Problème granulaire 1D (Al Shaer, Ali, 2005)	129
4.10	Schéma du plot ballasté de faible dimension	131
4.11	Dispositif expérimental du plot de faible dimension	132
4.12	Vue de dessus du plot de faible dimension	132
4.13	Ensemble capteur d'effort, plaque de transmission d'effort et élastomère.	133
4.14	Courbes d'étalonnage des capteurs d'effort	133
4.15	Mise en œuvre du ballast du plot expérimental de faible dimension	134
4.16	Mesure de l'enfoncement de la plaque dans le ballast à chaque essai	136
4.17	Exemple d'essai sur un plot de 15 cm de ballast foisonné - Hauteur de chute de 30 cm	138
4.18	Synthèse des résultats expérimentaux d'amortissement du ballast(F-C1)	138
4.19	Exemple de calcul de vitesse de propagation dans le ballast compacté - Hauteur de chute de 30 cm	139
4.20	Synthèse des vitesses de propagation dans le ballast - Hauteur de chute de 30 cm - Épaisseur 15 et 30 cm de ballast	140
4.21	Schéma de l'influence de l'épaisseur de ballast sur le trajet des ondes	140
4.22	Force mesurée sur les différents essais avec la plaque d'appui posée	141
4.23	Force normalisée enregistrée sur le plot expérimental - plaque d'appui posée	142
4.24	Exemple de résultats de spectre de force - 15 cm de ballast compacté - plaque posée - Hauteur de chute de 30 cm	142
4.25	Modèle aux éléments finis du plot (CESAR-LCPC)	143
4.26	Maillage et conditions limites de la modélisation FEM (CESAR-LCPC)	144
4.27	Définition du chargement appliqué et des points de mesure	145

Table des figures

4.28	Visualisation de deux exemples de courbes de contrainte σ_{yy} au point 1 nommé F et au point 2 nommé C1 du maillage - 15 cm ballast foisonné	146
4.29	Exemple de visualisation des isovaleurs de contrainte σ_{yy} - 15 cm ballast foisonné - $\alpha = 0,001$, $\beta = 0,2$ - maillage déformé	147
4.30	Modèle Maxwell généralisé et correspondance des coefficients d'amortissement pour des ondes longitudinales.	148
4.31	Calage des paramètres de Rayleigh α et β selon le modèle de Maxwell généralisé.	149
4.32	Visualisation des réflexions sur le fond du modèle avec une épaisseur de ballast de 15 cm.	151
4.33	Exemples significatifs des résultats de modélisation suite à une étude paramétrique - $\alpha = 0,001$, $\beta = 0,02$ - 15 cm de ballast foisonné	152
4.34	Exemples significatifs de résultats de modélisation suite à une étude paramétrique - $\alpha = 0,004$, $\beta = 0,02$ - 15 cm de ballast foisonné	152
4.35	Bibliothèque de granulats polyédriques (Huang, 2010)	159
4.36	Échantillon numérique de ballast avec les granulats de Huang (2010)	159
4.37	Comparaison de la mesure et du calcul discret sur le capteur C1 - 15 cm de ballast foisonné	161
4.38	Comparaison de la mesure et du calcul discret sur le capteur C1 - 30 cm de ballast foisonné	161
4.39	Comparaison des résultats des simulations discrète et continue - 15 cm de ballast foisonné - hauteur de chute de 30 cm	163
4.40	Essais complémentaires avec un panneau de voie	172
A.1	Photographie d'une voiture Mauzin	173
A.2	Différents types de défauts ponctuels de géométrie de la voie - Meier Hirmer, Carolina (2009)	174
A.3	Principe de mesure du déflectographe à grande vitesse	176
A.4	Radar GPR - Fateh (2005); De Bold, Robert (2011)	177
A.5	Principe de fonctionnement du radar GPR, Fateh (2005)	178
A.6	Gammadensimètre à profondeur variable	179
A.7	Photographie du matériel de double sonde GDS200	180
A.8	Principe de mesure du densitomètre à membrane	181
A.9	Pénétrromètre dynamique PGD1000	182
A.10	Comparaison de résultats au pénétrromètre et à la double sonde gamma	182
A.11	Photographie du Panda	183
A.12	Test d'excitation au marteau (HET) (Esveld, 2001)	184
A.13	Exemple de réponse de l'essai d'excitation au marteau (Esveld, 2001)	185
A.14	Bourreuse mécanique lourde (photo Colas-Rail)	187
A.15	Diagramme de l'intensité du bourrage (Lamalle, 1951)	189
A.16	Injection pneumatique de ballast sous la traverse par le procédé "Stoneblower", Zarembski & Newmani (2008)	190
A.17	Fines produites par la maintenance des voies (bourrage et soufflage de ballast, Zarembski & Newmani (2008))	191

A.18 Dégradation de la voie après bourrage ou soufflage du ballast avec l'indice TQI (Zarembski & Newmani, 2008)	191
A.19 Trains de dégarnissage mécanique (photos ETF)	192
A.20 Déchargement de ballast depuis des wagons de trémies (photos DROUARD ETF)	192
A.21 Groupe de vibration d'un stabilisateur dynamique	193
A.22 Photo de l'essai Bouba	194
A.23 Représentation du tassement du ballast en fonction du temps	195
A.24 Photographie de l'essai BETTER	197
A.25 Vibrogir, http://www.rtse-workshops.org/IMG/pdf/56._ruffenach_-_ballast_characterisation_at_sncf_-_ballast_ageing.pdf	198
B.1 Mise en œuvre des matériaux au chargeur	200
B.2 Structures des planches 1 et 2 pour l'étude du ballast	200
B.3 Photographies de la planche 2 avec une épaisseur de 60 cm de ballast	200
B.4 Structure expérimentale de la planche 3	201
B.5 Photographies de la planche 3 avec une épaisseur de 80 cm de ballast	202
B.6 Structure expérimentale de la planche 4	202
B.7 Photographies de la planche expérimentale 4	203
B.8 Moyens de compactage des matériaux de la structure des planches 1 et 4	207
B.9 Photographie du compactage de la planche 2 avec 30 cm de ballast	207
B.10 Schéma des couches avec visualisation des contrôles d'épaisseurs de densité et de portance réalisés à la mise en œuvre	210
B.11 Photographie des mesures de nivellement	211
B.12 Contrôle de la masse volumique sèche	213
B.13 Photographies de la double sonde gamma - planche 2 - 90 cm de ballast	214
B.14 Densité du ballast obtenue avec la double sonde gamma sur la planche 2	215
B.15 Photographie d'un essai à la plaque sur la grave 0/31,5	216
B.16 Géophones vissés sur le pot vibrant au moyen d'une tige filetée	222
B.17 Unité RTC100 fixée sur le support du pot vibrant	222
B.18 Calibration des géophones sur pot vibrant	224
B.19 Graphes des arrivées des ondes sismiques - Marteau V - Offset de 25 cm	226
B.20 Graphes des arrivées des ondes sismiques - chute de masse - Offset de 25 cm	227
B.21 Fonction de transfert source - récepteur	228
B.22 Exemple de résultat sur l'arrivée des ondes avec les vibrateurs	228
B.23 Zoom sur un exemple de signal d'un vibreur pneumatique	229
B.24 Exemple de traitement par corrélation	229
B.25 Rapport spectraux H / V événement - planche 1 - marteauV - offset 25 - 0 Hz > f > 4000 Hz	231
B.26 Rapport spectraux H/V événement - planche 1 - marteauV - offset 25 - 0 < f < 500 Hz	231
B.27 Moyenne des rapports spectraux H sur V des géophones 1 à 8 - planche 2 - 30 cm de ballast	232

Table des figures

B.28 Moyenne des rapports spectraux H sur V des différents essais des géophones 1 à 4 - planche 1 - 30 cm de ballast compacté (graphes a), c), e), g) - 30 cm de ballast foisonné (graphes b), d), f), h)	233
B.29 Résultat de cross corrélation sur la réponse des capteurs de la flûte de la planche 3	235
C.1 Plot de 15 cm de ballast compacté	237
C.2 Plot de 15 cm de ballast foisonné	237
C.3 Plot de 30 cm de ballast compacté	238
C.4 Plot de 30 cm de ballast foisonné	238
C.5 Résultats de la modélisation avec les coefficients définis selon le modèle de Maxwell généralisé - 15 cm de ballast foisonné - Forces mesurées et calculées à la source (F) et au point C1	240

Liste des tableaux

1.1	Exigences et valeurs limites des points singuliers du fuseau du ballast (Afnor, 2003)	13
1.2	Catégories de colmatage en fonction de trois indicateurs de colmatage du ballast	18
1.3	Exigences et valeurs limites de résistance mécanique des ballasts en fonction du type de voie (Afnor, 1996)	19
2.1	Répartition de l'énergie d'une source vibrante, Miller & Pursey (1955)	42
3.1	Bande de fréquences utile pour une couche de 30 cm de ballast	60
3.2	Instrumentation en surface des différentes planches	63
3.3	Paramètres du dispositif sismique (Heisey & Meyer, 1982; Tokimatsu et al., 1991)	68
3.4	Synthèse des essais et résultats de la planche 1	72
3.5	Synthèse des essais et résultats de la planche 2	72
3.6	Synthèse des essais et résultats de la planche 3	72
3.7	Synthèse des essais et résultats de la planche 4	72
3.8	Vitesses des mesures sismique sur les différentes planches expérimentales . . .	76
3.9	Résultats des vitesses sismiques sur la GNT - planche 3	83
3.10	Épaisseurs calculées et mesurées - matériaux compactés	85
3.11	Épaisseurs calculées et mesurées - matériaux foisonnés	85
3.12	Distance à partir de laquelle l'énergie $E = \frac{1}{2}E(f_p)$ avec f_p la fréquence prépondérante - Ballast compacté et foisonné - Offset de 25 cm	98
3.13	Distance à partir de laquelle l'énergie $E = \frac{1}{2}Ef_p$ (avec f_p la fréquence prépondérante) - Ballast et sable compactés - Offset de 55 cm	98
3.14	Paramètres d'entrée de la couche de surface du modèle	100
4.1	Synthèse bibliographique des méthodes de modélisation du ballast	125
4.2	Masse et dimensions des éléments utiles à la modélisation discrète	134
4.3	Synthèse des paramètres des essais sur plot de faible dimension	135
4.4	Récapitulatif des vitesses de propagation calculées dans le ballast foisonné et compacté	139
4.5	Paramètres de la modélisation	150
4.6	Paramètres de la modélisation discrète	160
4.7	Récapitulatif de l'amortissement des essais modélisés par approche discrète (code STTAR3D)	162
A.1	Définition des niveaux de sécurité et du nom associé suivant la taille des défauts	175
A.2	Caractéristiques des essais triaxiaux de Shenton et Hettler	195
B.1	Matériaux des planches 1 et 2	203
B.2	Matériaux de la planche 3	204

Liste des tableaux

B.3	Matériaux de la planche 4	204
B.4	Récapitulatif du compactage des couches des planches 1 et 2	209
B.5	Récapitulatif du compactage des couches de la planche 3	209
B.6	Récapitulatif du compactage des couches de la planche 4	211
B.7	Épaisseurs des couches mises en œuvre contrôlées par nivellement	212
B.8	Moyenne des 6 mesures GPV réalisées sur les couches de sable et de GNT 0/31,5 des planches 1 et 2	213
B.9	Moyenne des 2 essais de double sonde réalisés sur le ballast	214
B.10	Résultats des essais de plaque	216
B.11	Récapitulatif des capteurs planche 2 verticale dans le plot compacté	217
B.12	Récapitulatif des capteurs horizontaux de la planche 2 dans les plots compacté et foisonné	218
B.13	Récapitulatif des capteurs horizontaux de la planche 2 dans les plots compacté et foisonné	219
B.14	Récapitulatif des capteurs verticaux de la planche 2 dans le plot foisonné	220
B.15	Caractéristiques du pot vibrant	223
C.1	Synthèse bibliographique des paramètres de la modélisation continue du ballast.	239

Notations principales

Liste des symboles

$a(t)$	mouvement	m
A	amplitude de la déformation	m
A_0	amplitude initiale de la déformation	m
$A_m(x, \omega)$	amplitude spectrale du signal sismique	
$A(x)$	amortissement	
\underline{B}_{il}	vitesse du solide i	
c	cohésion	kPa
c_m	vitesse de phase du mode m	m/s
$[C]$	matrice d'amortissement	Ns/m
C_a	compacité absolue	
C_c	coefficient de courbure	
C_u	coefficient d'uniformité de Hazen	
d	distance	m
d	écartement des géophones de la flûte sismique	m
d	plus petite dimension des grains	mm
$div \underline{u}$	divergence de u	
d_{min}	diamètre mini de la fraction retenue avec le plus petit tamis	mm
D	plus grande dimension des grains	
DC3	classe 3 de difficulté de compactage	
D_{dis}	amortissement discret	
D_{exp}	amortissement expérimental	
D_{max}	diamètre maxi de la fraction retenue avec le plus grand tamis	mm
D_P	taux d'amortissement hystérétique des ondes P	
D_S	taux d'amortissement hystérétique des ondes S	
e	indice des vides	
e	coefficient de restitution modélisation discrète	
e_c	épaisseur de matériau à compacter	m
e_1	épaisseur de la couche 1	m
e_2	épaisseur de la couche 2	m
E	module d'Young	MPa
\overline{E}	module d'Young complexe	MPa
E_b	module élastique du ballast	MPa
EV1	Essai de plaque - module du premier chargement	Pa
EV2	Essai de plaque - module du deuxième chargement	Pa
f	fréquence d'émission	Hz
$f - c$	domaine fréquence-vitesse	
F_I	fouling index	

F_N	Force normale	
F_t	Force de frottement	
f_0	fréquence de résonance	Hz
f_p	fréquence prépondérante	Hz
g	accélération due à la pesanteur	m/s ⁻¹
G	module ou coefficient de cisaillement	
G_i	vitesse au centre de gravité	
G_0	module ou coefficient de cisaillement	
\underline{grad}	gradient	
\underline{H}	épaisseur de la couche sédimentaire en surface	m
i	orientation de la facette d'un cube	
i_1	angle d'incidence de réfraction limite	°
I	intercept ou ordonnée à l'origine	ms
I_A	intensité d'Arias	
I_K	indicateur du pseudo potentiel de dissipation	
j	projection de la contrainte dans la direction concernée	
k	nombre d'onde	m ⁻¹
k_b	raideur du ballast	MN/m
k_m	nombre d'ondes du mode m	m ⁻¹
$k - \omega$	domaine pulsation spatiale - pulsation temporelle	
K	module d'incompressibilité	Pa
$[K]$	matrice de rigidité	N/m
L	longueur du dispositif sismique	m
L_c	largeur de la bille du compacteur	m
m	masse	kg
$M(\omega)$	module complexe	
$[M]$	matrice de masse	kg
n	porosité	
n_c	nombre de passes de compacteur	
\underline{N}_l	vecteur normal au point de contact pointant vers le solide i	
O	offset à la source	m
p_m	lenteur du mode m	m ⁻¹
P	charge du véhicule roulant	kN
P	pression	Pa
\underline{P}^d	percussion de dissipation	N
\underline{P}^{ex}	force de percussion au point d'impact	N
\underline{P}^{int}	percussion interne	N
\underline{P}^{reac}	percussion réactive assurant la non interpénétration	N
PVC	pourcentage Void Contamination	
P_4	pourcentage de matériaux passant à 4,75 mm	
P_{200}	pourcentage de matériaux passant à 0,075 mm	
q, q2, q3 et q4	objectif de compactage (avec i, qualité du compactage)	
Q^{-1}	facteur de qualité	

Q_{si}	qualité des 4 classes de sols définies par la SNCF	
R	distance à la source	m
s	lenteur	s/m
SH	Onde de cisaillement de polarisation horizontale	
SV	Onde de cisaillement de polarisation verticale	
t	temps	(s)
T_d	durée du signal	s
\underline{u}	déplacement du point M au passage de l'onde	m
U_N^+	vitesse avant	m/s
U_N^-	vitesse après	m/s
V	volume total	
VA15	compacteur de marque Albault Vilette	
V_c	vitesse du compacteur	km/h
V_f	vitesse des ondes dans le fluide de la roche	m/s
V_{ma}	vitesse des ondes dans la matrice du sol	m/s
V_P	vitesse des ondes de compression	m/s
V_R	vitesse des ondes de Rayleigh	m/s
V_S	vitesse des ondes de cisaillement	m/s
V_S	volume des particules	m ³
X_c	distance critique	m
$X(t)$	vecteur de déplacement	
$\dot{X}(t)$	vecteurs vitesse	
$\ddot{X}(t)$	vecteurs accélération	
V_V	volume des vides	
V_1	Vitesse de propagation du milieu 1	m/s
V_2	Vitesse de propagation du milieu 2	m/s
W	teneur en eau	%
W_{OPM}	teneur en eau à l'OPM	%
W_{OPN}	teneur en eau à l'OPN	%
x	distance à la source	m
x	direction de propagation dans l'axe x d'un repère Oxyz	
z	direction de propagation dans l'axe z d'un repère Oxyz	
α	coefficient de rigidité - constante de Rayleigh	
β	coefficient d'amortissement - constante de Rayleigh	
δ_x	maille du modèle	mm
δ_p	variation de pression	Pa/m ²
δ_t	temps de propagation de l'onde	s
δ_t	pas de temps modélisation discrète	s
δ_{ij}	symbole de Kronecker	
$\delta_{\underline{u}}$	Laplacien de u	
d_n	distance entre deux sphère	m
DYNI	module dynamique de Cesar	
ε_r	constante diélectrique	F/m

ε_{ij}	tenseur des déformations	
ε_p	déformations à la limite élastique	m
η	coefficient d'amortissement hystérétique	
λ	premier coefficient de Lamé	
λ	longueur de l'onde de Rayleigh	m
λ^*	premier coefficient de Lamé complexe	
λ_{max}	longueur d'onde maximale	m
λ_{min}	longueur d'onde minimale	m
μ	deuxième coefficient de Lamé	
μ^*	deuxième coefficient de Lamé complexe	
∇	opérateur nabla	
ν	coefficient de Poisson	
ω	pulsation ou fréquence angulaire	rad/s
Φ	psudo potentiel de dissipation	
Φ	potentiel scalaire - composante de dilatation	
Ψ	potentiel vectoriel - composante de distorsion	
ρ_d	masse volumique du sol sec	kN/m ³
ρ_{dm}	masse volumique moyenne du sol sec	kN/m ³
ρ_{dOPN}	masse volumique du sol sec à l'OPN	kN/m ³
ρ_{dOPM}	masse volumique du sol sec à l'OPM	kN/m ³
ρ_{fc}	masse volumique du sol sec en fond de couche	kN/m ³
ρ_s	masse volumique des particules	kN/m ³
σ	contrainte	kN/m ²
τ	angle de frottement	°
θ_V	dilatation volumique	
θ	différence de phase	radian
ξ	coefficient d'amortissement visqueux	kNs/m

Acronymes

AFNOR	Association Francaise de NORmalisation
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BDT	Ballast Density Test
BEM	Boundary Element Method
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CATM	Certificat d'Aptitude Technique des Matériels
CER	Centre d'Expérimentations et de Recherches
CEREMA	Centre d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CNRS	Centre Nationale de la Recherche Scientifique
CSW	Continu Surface Waves

CVCR	Chaussée Visco-élastique sous Charge Roulante	
DC1	Dispersion Curve du mode 1	
DC2	Dispersion Curve du mode 2	
ENPC	École Nationale des Ponts et Chaussées	
ERTMS	European Railways Traffic Management System	
FEM	Finite Element Method	
FFT	Fast Fourier Transform	
FRA	Federal Research Administration of Illinois	
FWD	Falling Weight Deflectometer	
GDS200	Double Sonde Gamma profondeur 200 cm	
GM	Géophone monoaxial	
GNT	Grave Non Traitée	
GPR	Ground Penetrating Radar	
GPV	Gammadensimètre à Profondeur Variable	
GT	Géophone triaxial	
GTR	Guide technique des Terrassements Routiers	
H/V	rapport spectral les voies horizontales sur les voies verticales	
HSD	High Speed Deflectograph	
ICE	Intercity-Express	
IP	Indice de Plasticité	
KGS	Kansas Geological Survey	
LA	Los Angeles	
LAMI	Laboratoire Analyse des Matériaux et Identification	
LERMES	Laboratoire d'Etudes et de Recherches en mécanique des structures	
LGV	Ligne à Grande Vitesse	
LPC	Laboratoire des Ponts et Chaussées	
LRS	Long Rail Soudé	
LTPT	Lateral Tie sleeper Push Test	
MASW	Multichannel Analysis of Surface Waves	
MDA	Micro Deval Abrasif (pour ballast)	
MDE	Micro Deval en présence d'Eau (pour gravillons de soufflage)	
MEO	Mise En Oeuvre	
OPN	Optimum Proctor Normal	
OPM	Optimum Proctor Modifié	
PANDA	Pénétromètre dynamique léger	
PLT	Plate Load Test	
PS-logging	Sismique de forage Down hole	
PVC	Percentage Void Contamination	%
ReMI	Refraction Microtremor	
RSMV	Rolling Stiffness Measurement Vehicle	
SASW	Spectral Analysis of Surface Waves	
S/B	Signal sur Bruit	

SIE	Sciences, Ingénierie et Environnement	
SNCF	Société Nationale des Chemins de Fer	
TGV	Train à Grande Vitesse	
TMV	Transmission Voie Machine	
TRC	Taux Relatif de Colmatage	%
UIC	Union Internationale des Chemins de fer	
USCS	Unified Soils Classification System	
VBS	Valeur au Bleu des Sols	
VER	Volume Elementaire Représentatif	
VM3, VM4	Vibrant Monobille classe 3 et 4	
VT2	Vibrant Tandem classe 2	
WL	Limite de liquidité	
WP	Limite de plasticité	

Introduction

La maintenance et l'entretien des voies ferrées constituent un enjeu technique et économique majeur pour les années à venir. Dans ce contexte de vieillissement des voies, l'exploitant doit garantir pour les usagers une bonne qualité de service ainsi qu'un bon niveau de sécurité. Pour répondre à ce besoin, un contrôle régulier de l'ensemble du réseau ferroviaire est effectué. Il permet de détecter les défauts géométriques et ainsi réparer si besoin tout problème constaté. Lorsque les défauts sont trop importants, l'exploitant procède au bourrage du ballast permettant ainsi de rétablir le niveau de la voie, en la repositionnant avec précision dans son tracé.

Le contrôle des paramètres de compactage en cours de mise en œuvre est nécessaire pour garantir la qualité de l'ouvrage. Il consiste à définir pour un objectif de compactage donné et pour un type de matériau, le matériel, l'épaisseur de la couche, le nombre de passes et la vitesse du matériel de compactage (Corté et al., 2000).

Dans le cas de la mise en œuvre du ballast, la qualité de compactage est empirique. Cette phase aussi appelée phase de stabilisation intervient suite à l'intervention de moyens mécaniques dont la qualité dépend du nombre de passes de bourrage (annexe A.6.1). Cette technique a pour but de densifier le ballast au point d'application de la charge tout en remettant à niveau le tracé géométrique de la voie (annexe A.1). Cette densification évite le basculement des traverses pendant les sollicitations dues au trafic. La stabilisation du ballast peut être assurée par la circulation de véhicules roulants jusqu'à obtenir une charge totale cumulée équivalent à $1,5 \cdot 10^5$ cycles (Quezada, 2014). Peu d'essais existent pour vérifier *in situ* la densité du ballast sous la traverse (annexe A.6.1). Le contrôle de la densité en place se fait soit par des mesures directes, soit par des mesures indirectes (annexe A.4). Ainsi, la compacité du ballast est un critère majeur pour le diagnostic des voies.

Aujourd'hui, l'état de serrage du ballast est étudié au moyen de méthodes destructives. Selig & Waters (1994) décrivent ces différents essais comme le BDT (Ballast Density Test), le PLT (Plate Load Test) et le LTPT (Lateral Tie Sleeper Push Test). Ces méthodes ponctuelles sont difficiles à mettre en place et ne répondent pas à la problématique de doublement de la maintenance des voies des prochaines années car elles nécessitent d'interrompre le trafic.

Ce travail propose d'utiliser les méthodes sismiques pour évaluer la compacité du ballast ferroviaire neuf et ainsi détecter des zones de faiblesse sur le réseau après la mise en œuvre de la structure.

Le ballast est un matériau difficile à modéliser comme un milieu continu car il suit plutôt un comportement de milieu discret. Cependant, l'approche

numérique, qui s'appuie sur des hypothèses de milieux continus, fait l'objet de recherches variées autour du ballast : [Lam et al. \(2012\)](#) considèrent par exemple l'ensemble "rail-traverse-ballast" comme une poutre de Timoshenko. Ces études permettent de détecter les désordres du ballast par mesures des vibrations d'une traverse en béton ; l'étude des modes de propagation reflète l'état de la couche de ballast. [Stark et al. \(2013\)](#) présentent les recherches préliminaires sur le développement et l'utilisation des méthodes sismiques pour l'évaluation des conditions de mise en œuvre du ballast, dans le but de prédire les inspections périodiques, en réalisant un essai sur modèle réduit. [Zagyapan & Fairfield \(2002\)](#) ont étudié les méthodes d'impact et les méthodes continues en surface pour mesurer l'épaisseur et la masse volumique du ballast ferroviaire au moyen de deux accéléromètres et pour deux distances source/récepteur. [Hwang & Park \(2014\)](#) ont étudié la dispersion des ondes de Rayleigh dans le ballast à l'aide de deux géophones. L'analyse est basée sur une décomposition spectrale en ondelettes permettant la détermination des vitesses de phases et de groupe des signaux.

Cependant, ces études sont succinctes et nos expérimentations n'ont pas permis de reproduire de résultats similaires. En effet, la variabilité d'une mesure sismique dans un tel milieu ainsi que les conditions d'instrumentation ne sont pas étudiées en détail. Ainsi, ces données expérimentales ne permettent pas de conclure sur la pertinence des méthodes sismiques pour caractériser la compacité du ballast ferroviaire.

C'est pourquoi nous proposons dans cette étude une approche expérimentale détaillée. Premièrement, sur une planche réalisée à l'échelle 1, différents dispositifs sont déployés en surface, dans le ballast et dans la sous-couche (figure 1). Deuxièmement, à des fins de comparaison, un milieu continu (sable) de dimensions similaires est réalisé. Troisièmement, ces planches permettent d'optimiser le déploiement de l'instrumentation au sein de la structure. Enfin, dans l'hypothèse où le ballast peut être considéré comme un milieu continu, une approche classique de traitement des signaux sismiques est proposée.

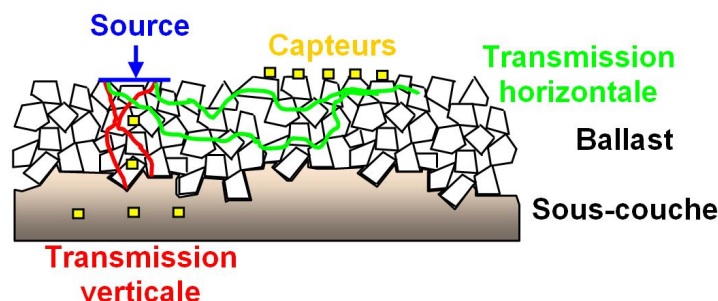


Figure 1 – Schéma de principe des dispositifs étudiés sur ballast et sous-couche

Ce travail est une étude préalable à la connaissance de la compacité du ballast sur la zone d'intérêt du bourrage correspondant à un volume restreint

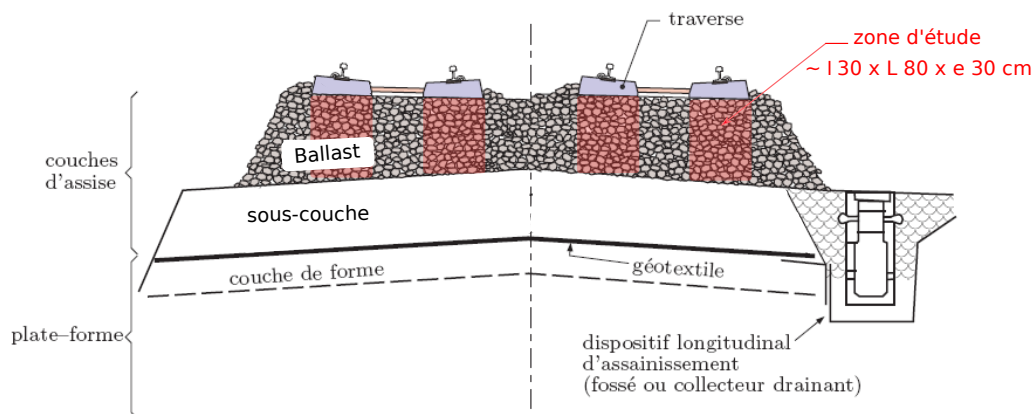


Figure 2 – Zone d'intérêt de l'état de serrage du ballast ferroviaire

de 30 cm de largeur par 80 cm de longueur par 30 cm d'épaisseur sous la zone d'appui de la traverse (figure 2).

Ce mémoire s'organise de la manière suivante :

- Le premier chapitre s'attache à présenter les principaux composants d'une voie ferrée et à décrire de façon détaillée le fonctionnement du ballast ainsi que les différentes méthodes d'inspection et de diagnostic.
- Le deuxième chapitre décrit les différents types d'ondes se propageant dans un milieu élastique homogène et les paramètres influençant la propagation des ondes. Il présente également les études antérieures sur la propagation à travers le ballast et dans la structure de la voie.
- Le troisième chapitre concerne la définition des expérimentations réalisées à l'échelle 1 avec un contrôle des conditions de mise en œuvre (épaisseurs, masse volumique, teneur en eau, module), la description de l'instrumentation sismique du ballast et des structures expérimentales ainsi que les traitements réalisés. Ces derniers concernent :
 - le rapport signal sur bruit permettant de distinguer le signal par rapport à ce qui n'est pas du signal, appelé bruit et ainsi définir la gamme de fréquence d'une source sismique utile dans les traitements,
 - le calcul de la vitesse des ondes,
 - la décroissance d'amplitude à travers le ballast,
 - les courbes de dispersion pour les deux états de serrage du ballast
 - ainsi que les rapports spectraux H/V événement et bruit de fond.
- Enfin, le quatrième chapitre aborde la simulation numérique de la propagation d'un signal dans le ballast en comparant une modélisation continue, une modélisation discrète et une expérimentation de faible dimension.

Fonctionnement d'une voie ferrée et caractérisation du ballast

1.1 La voie ferrée

1.1.1 Introduction

La voie ferrée (figure 1.1) est un chemin de roulement pour les convois ferroviaires, constitué de deux files de rails qui permettent de guider les trains et de supporter les charges induites par la circulation.

La structure de la voie ferrée est constituée de différentes couches (figure 1.1). On distingue :

- la superstructure (ou armement comprenant les rails, les semelles absorbantes en caoutchouc ou autre, les attaches, les traverses,) qui supporte les charges et qui est donc soumise à un entretien périodique. Un des rôles de l'armement est de transmettre les efforts à la structure (ballast et sous-couche) ;
- la structure (ou couches d'assises) avec le ballast et la sous-couche ferroviaire qui reprennent les efforts de trafic ;
- l'infrastructure (ou plate-forme) comprenant la couche de forme et le sol support, qui n'est pas directement soumise aux charges ferroviaires et qui n'est pas concernée par la maintenance des voies.

L'ouvrage de Alias (1977) détaille les différents éléments constitutifs d'une voie ferroviaire.

Les voies sont classées en plusieurs catégories. A chacune de ces catégories correspond en premier lieu une vitesse maximale allant de 80 à 300 km/h pour les trains passagers et de 30 à 120 km/h pour les trains de marchandises (UIC code 714R-1989) et en second lieu une charge à l'essieu variant de 70 kN pour un tramway jusqu'à 225 kN pour un wagon de fret ; le poids par mètre du véhicule varie de 50 à 80 kN (UIC 700-O-2004). Les fiches de l'Union Internationale des Chemins de fer décrivent ces classifications. Certains pays

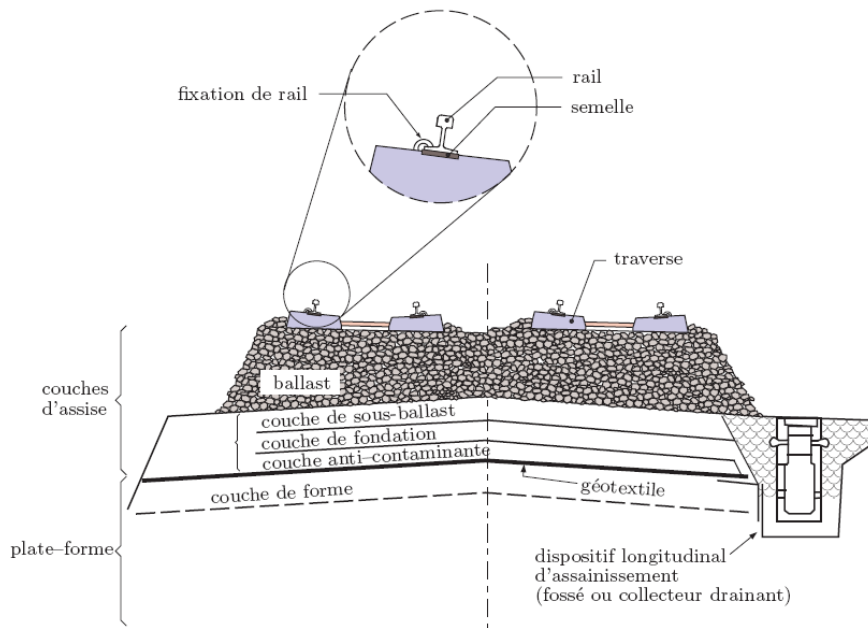


Figure 1.1 – Profil d’une structure de voie classique (Kouroussis, 2009)

utilisent des charges à l’essieu plus élevées ; celle du transport américain de marchandises est par exemple de 250 à 350 kN.

La fatigue du rail ne suit pas une loi normale par rapport à la charge P en kN. En effet, les efforts transmis dans le rail sont définies par le paramètre P^a où a est une valeur variant de 3 à 4, s’approchant plutôt de 4. Toute augmentation de la charge à l’essieu conduit donc à une augmentation plus grande de la fatigue de la voie. Les éléments de la voie doivent répartir les charges des trains jusqu’à la plateforme (Esveld, 2001).

La vitesse des convois ferroviaires est également un paramètre important car le ballast ne présente pas le même comportement suivant la fréquence de sollicitation. Le record mondial de vitesse a été atteint avec un TGV en avril 2007 avec une vitesse de 570 km/h.

1.1.2 Le rail

Le rail constitue le premier élément de contact entre le véhicule et la voie. Il permet de guider le train et de répartir sa charge sur plusieurs traverses (7 à 11). Il est incliné de 1/20 sur les voies classiques et de 1/40 sur les lignes à grande vitesse. Il existe différentes normes d’écartement des rails suivant les pays. La norme la plus répandue dans le monde fut créée en Angleterre et définit un écartement de 1435 mm soit 4 pieds et 8,5 pouces.

1.1 La voie ferrée

Le rail moderne est généralement du type « Vignole » (figure 1.2).

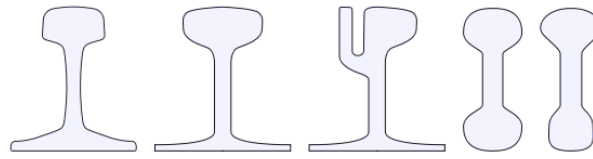


Figure 1.2 – Différents types de rail (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Types_de_rails2.svg?uselang=fr), de gauche à droite, type UIC 60, type Vignole, type Broca ou à gorge, type double champignon symétrique, et asymétrique

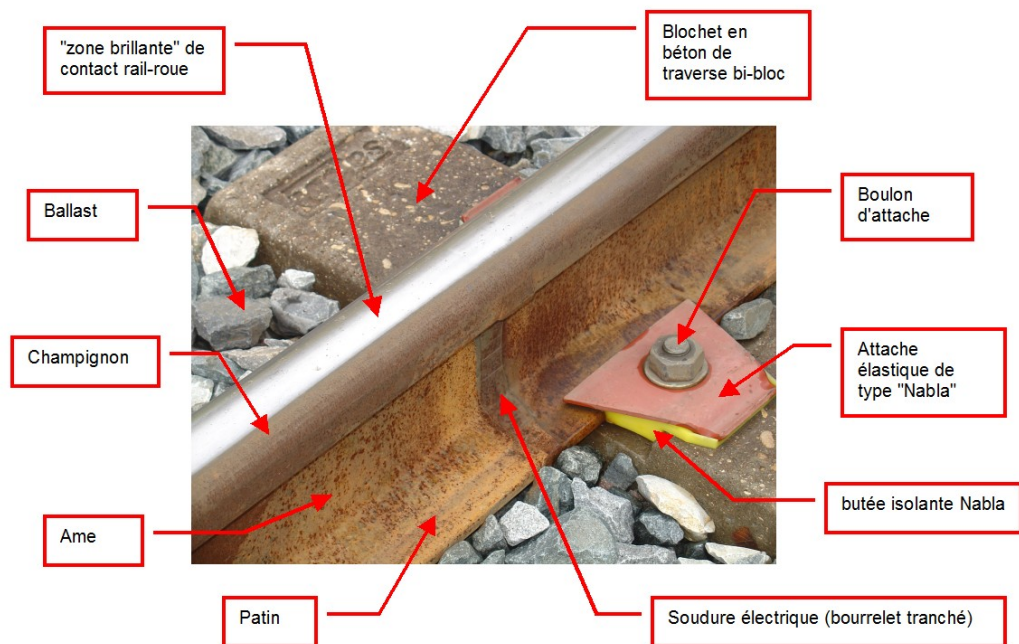


Figure 1.3 – Composants de l'armement d'une voie ferrée, https://fr.wikipedia.org/wiki/Fixation_des_rails_aux_traverses

Dans la section transversale du rail (figure 1.3), on distingue :

- le champignon qui constitue le chemin de roulement et qui assure le contact roue/rail,
- l'âme, filet vertical qui relie le champignon au patin et qui reprend les efforts de cisaillement,
- le patin, qui s'appuie sur la traverse et transmet les efforts.

Sur les lignes importantes, la masse linéique standard du rail est de 60 kg par mètre.

Depuis les origines du chemin de fer, la dilatation des rails engendrée par les variations de température constitue une difficulté pour les exploitants ferroviaires. À l'origine, des barres étaient reliées au moyen d'éclisses afin de permettre un degré de liberté. À partir des années 1930, sont apparus les longs rails soudés avec le développement de techniques de réalisation et d'attaches élastiques.

1.1.3 Les attaches et la semelle

Afin de maintenir les rails sur les traverses, des systèmes d'attache sont utilisés. Ces systèmes varient en fonction du type de traverse, du type de rail, du mode de pose de la voie (Long Rail Soudé (LRS) ou barres normales), mais aussi en fonction de l'histoire propre de chaque exploitant ferroviaire.

Une attache rigide permet un bon maintien transversal du rail mais n'empêche pas le rail de cheminer longitudinalement. En effet, l'effort transmis suite à la dilatation du rail ou aux forces de freinage et d'accélération induit un mouvement longitudinal qui n'est pas repris par l'attache, induisant un déplacement longitudinal du rail ; d'où l'utilité des attaches élastiques par exemple de type « RN » et « Nabla ».

Ces attaches sont mises en œuvre avec des semelles en caoutchouc qui se placent entre la traverse et le dessous du rail. Ces semelles ont pour rôle d'amortir une partie des vibrations et de permettre le débattement vertical du rail sans endommager la traverse. On trouve aussi souvent des cales en plastique qui servent à assurer un maintien latéral du rail. L'absence de vissage supprime de facto le risque de dévissage. Il n'est donc plus besoin de vérifier périodiquement le serrage des attaches.

1.1.4 La traverse

Le rôle des traverses est de transmettre au ballast les charges des véhicules circulant sur les rails. Elles maintiennent l'écartement des deux files de rails ainsi que l'inclinaison du rail. On utilise principalement des traverses en bois ou en béton. Le travelage, c'est-à-dire le nombre de traverses au kilomètre, est variable. En France, sur le réseau ferré, il est généralement de 1666 traverses/km.

Les conditions d'appui des traverses sur le ballast jouent un rôle essentiel sur la transmission de ces charges.

La traverse, initialement constituée de bois, a été remplacée au cours du temps par des traverses en acier, puis en béton armé ou en béton précontraint

1.1 La voie ferrée

monobloc ou bi-bloc, pour des raisons de coût et de performances accrues. En effet les traverses en bois sont d'une grande sensibilité aux agents atmosphériques, et trop légères pour la pose de longs rails soudés. La traverse type bi-bloc, constituée de 2 blochets en béton armé, mesure 2,415 m de long et pèse 245 kg.

1.1.5 Le ballast

Le ballast considéré comme faisant partie de la structure d'assise est l'élément support de la voie ([Afnor, 1996](#); [Dourthe et al., 2009](#)). Son rôle est :

- de transmettre uniformément les charges concentrées appliquées sur les traverses jusqu'à la plate-forme,
- d'ancrer les traverses,
- d'amortir une part des vibrations en provenance du contact rail-roue grâce à sa structure poreuse,
- de faciliter l'entretien du nivellement de la voie,
- d'assurer le drainage de la voie.

Le ballast est un granulat 25/50 ou 31,5/63 mm (d/D : diamètre minimal du grain/diamètre maximal du grain) provenant du concassage de roches extraites dans des carrières de roches dures (granite, diorite, rhyolite, porphyre, quartzite, ...). Par ailleurs, il doit répondre à des critères de qualité géométrique et mécanique qui portent sur la granulométrie, la dureté, la forme et la propreté des roches.

Le ballast se trouvant directement en contact avec la sous-couche ferroviaire constituée d'éléments plus fins (0/31,5), un mélange s'opère entre ces deux couches, créant une couche intermédiaire.

Les caractéristiques et le comportement du ballast sont détaillés dans le paragraphe [1.2](#) et l'annexe [A.6](#).

1.1.6 La sous-couche

La sous-couche est une couche de transition située entre le ballast et la plate-forme. Elle assure plusieurs fonctions comme l'évacuation des eaux de pluie, la protection contre l'érosion, le gel, et contre la contamination du ballast par les matériaux de la plate-forme. Elle contribue également à une meilleure répartition des charges transmises sur la partie supérieure de la plate-forme à l'égard de la portance du sol.

La nature et l'épaisseur de la sous-couche dépendent, comme pour la plate-forme, des caractéristiques du sol, des caractéristiques géologiques et hydrologiques du site, ainsi que des conditions climatiques.

Pour les lignes à grande vitesse, elle comprend plusieurs niveaux :

- une couche de « sous-ballast », constituée de grave propre 0/31,5 mm et dont la dureté est définie en fonction de la vitesse et du tonnage du trafic ;
- une couche de « fondation », qui assure la stabilité des sols de caractéristiques mécaniques moyennes ou médiocres et qui est également constituée de graves.

1.1.7 La plate-forme

La plate-forme est la partie supérieure de l'ouvrage en terre supportant les couches d'assise de la voie.

Sa souplesse est relativement grande en regard des autres composants de la voie qui permettent pour une large part d'assurer, par leur nature et leur épaisseur, le bon comportement de la voie ferrée du point de vue rigidité, tenue et drainage. La qualité de la plate-forme dépend de deux paramètres : la nature géotechnique du sol et les conditions hydrogéologiques et hydrologiques locales.

On distingue quatre classes de sols de qualité Qsi ([Sncf, 1999](#); [Sptf, 2009](#); [Boussafir, 2011](#)) :

- S0 : sols 'impropres' à la réalisation d'une plate-forme correcte, on procède à la substitution du matériau (sol rapporté en remblai) sur une certaine épaisseur,
- S1 : sols 'médiocres' mais acceptables tels quels,
- S2 : sols 'moyens',
- S3 : sols 'bons'.

1.2 Le Ballast : caractéristiques et méthodes d'auscultation

1.2.1 Généralités

Le ballast, extrait de carrières de roches massives (matériaux calcaire et alluvionnaire exclus), est constitué de granulats durs, non gélifs (gneiss, porphyres, basaltes, etc.), anguleux et ayant une très forte résistance à l'abrasion.

Le ballast se met en œuvre aisément par le compactage sous les charges roulantes. Les granulats s'imbriquent les uns dans les autres pour donner au ballast sa résistance optimale. Ce compactage peut être également effectué mécaniquement, par une boussoir, pour obtenir ou rétablir une géométrie

1.2 Le Ballast : caractéristiques et méthodes d'auscultation

souhaitée, et aussi pour acquérir une résistance initiale suffisante à la stabilité de la voie.

Par ailleurs, outre sa propreté, le ballast sous la traverse doit être suffisant en quantité sous les traverses, avec une épaisseur minimale de :

- 15 cm sous traverses en bois,
- 20 cm sous traverses en béton,
- 30 cm sous traverses en voie TGV.

Cette épaisseur de ballast ne peut être non plus exagérée ; en pratique au-delà de 45 à 50 cm d'épaisseur, le compactage devient inefficace et la stabilité de la voie est affectée.

On peut distinguer trois phases successives dans la durée de vie du ballast des voies ferrées :

1. La première est la phase de mise en place et de stabilisation du ballast, soit par des moyens mécaniques spécifiques, soit par des circulations à vitesse réduite jusqu'à obtenir un tonnage (charge totale cumulée dans le temps) correspondant à la stabilisation. Celle-ci est habituellement évaluée à 200 000 tonnes de circulation.
2. La deuxième phase correspond à la phase de circulation à vitesse normale sur la voie. On observe lors du passage de chaque bogie un déplacement élastique (ou réversible) du ballast sous chargement (appelé déflexion), et un déplacement irréversible du ballast après déchargement (appelé tassement). Pour un cycle de chargement, l'ordre de grandeur du tassement est entre 104 et 106 fois inférieur à la déflexion. La durée de cette phase est évaluée à quelques millions de cycles.
3. Arrive en dernier lieu la phase d'usure du ballast, caractérisée par une disparition des aspérités et une modification de la granulométrie par rupture des grains. Cette phase, apparaissant aux environs de 15 millions de cycles, n'est que rarement atteinte en voie, puisqu'une opération de maintenance lourde (renouvellement de voie) intervient auparavant.

Au fur et à mesure des circulations, on observe que le tassement entre deux traverses consécutives peut être différent. Ce tassement différentiel engendre un défaut de voie néfaste dans un premier temps au confort du passager, et dans un deuxième temps à la sécurité de la voie, imposant des ralentissements des circulations très coûteux. En conséquence la connaissance de l'évolution du tassement vertical et latéral des voies de chemin de fer ballastées permet de prédire l'apparition et l'évolution des défauts de voie et d'anticiper la mise en œuvre d'une méthode d'entretien rationnelle (Voir annexe A pour les compléments sur le ballast).

1.2.2 Granulométrie

À la mise en œuvre d'une nouvelle voie ferrée ou pendant le renouvellement de ballast d'une voie existante, le matériau mis en œuvre présente une granulométrie bien graduée variant de 25 à 50 mm pour les lignes classiques et de 31,5 à 63 mm pour les lignes LGV. Les éléments grossiers ne présentent pas de fines, ce qui confère au ballast de très bonnes caractéristiques mécaniques. Il assure un bon drainage, évitant ainsi une pression interstitielle liée à la présence d'eau retenue dans les fines. Néanmoins, les chargements répétés des trains conduisent à fracturer le ballast, ce qui lui confère une matrice fine. D'autres apports de fines sont décrits dans le paragraphe 1.2.4. La caractérisation de ces matériaux est délicate du fait de la présence de gros éléments. Actuellement, il n'existe pas d'outil fiable permettant de définir les paramètres de déformabilité et de rupture.

Le ballast répond à des critères de qualité géométrique et mécanique qui portent sur la granulométrie (25/50 mm lignes classiques ou 31,5/63 mm LGV), la dureté, la forme et la propreté des granulats. Ces critères sont fixés par des normes ([Afnor, 1996, 2003](#)) ou des documents de spécification SNCF ([Sncf, 1999](#)) qui traduisent un savoir faire empirique. Les spécifications du ballast doivent être vérifiées quatre fois par an en carrière avec un échantillon représentatif de masse équivalente à au moins 40 kg. La préparation de l'échantillon suit la norme expérimentale [Afnor \(1990\)](#).

La masse volumique des particules solides de ballast est de 2 800 kg/m³ et sa qualité est évaluée par des tests normalisés (Normes françaises 1996 - [Afnor \(1996\)](#)), imposés par la Société Nationale des Chemins de Fer en France ou proposés par les ouvrages de [Selig & Waters \(1994\)](#) et [Zarembski & Newmani \(2008\)](#) pour les voies nord-américaines. La masse volumique sèche généralement rencontrée en voie varie de 1 245 kg/m³ et 1 445 kg/m³ suivant la coupure utilisée ([Foret et al., 2003](#)).

Le ballast doit présenter une granularité de 25/50 mm ou 31,5/63 mm qui est vérifiée au moyen de tamis de contrôle à mailles carrées. Le ballast doit respecter les valeurs de fuseau définies dans le tableau 1.1 et représentées sur la figure 1.4.

Les différentes classifications des sols granulaires reposent en général sur la classification américaine USCS (Unified Soils Classification System) dont les bases sont :

- le pourcentage d'éléments gros et fins,
- la forme de la courbe granulométrique,
- les limites de liquidité et de plasticité (W_L et W_P) ainsi que l'indice de plasticité I_P .

1.2 Le Ballast : caractéristiques et méthodes d'auscultation

Tableau 1.1 – Exigences et valeurs limites des points singuliers du fuseau du ballast (Afnor, 2003)

Points singuliers des fuseaux	DMC (mm)		Valeur du fuseau de contrôle
$D_{max} : 1,25D$	63	Exigences	p=100 %
		Valeurs limites	$p=97\%$
D	50	Exigences	85% ≤ p à D ≤ 99 %
		Valeurs limites	$85\% \leq p \text{ à } D \leq 80 \%$
Tamis intermédiaire	40	Exigences	40% ≤ p à D ≤ 74 %
	31,5	Valeurs limites	10% ≤ p à D ≤ 35 %
d	25	Exigences	35% ≤ p à D ≤ 79 %
		Valeurs limites	$5\% \leq p \text{ à } D \leq 40 \%$
$d_{min} : 0,63d$	16	Exigences	p ≤ 5 %
		Valeurs limites	$p \leq 10\%$
		Exigences	p ≤ 1 %
		Valeurs limites	$p \leq 2\%$
Avec : DMC=Dimension des mailles carrées p=passant d=plus petite dimension des grains D=plus grande dimension des grains d_{min} =diamètre min. de la fraction retenue au travers du plus petit tamis D_{max} =diamètre max. de la fraction retenue au travers du plus grand tamis			

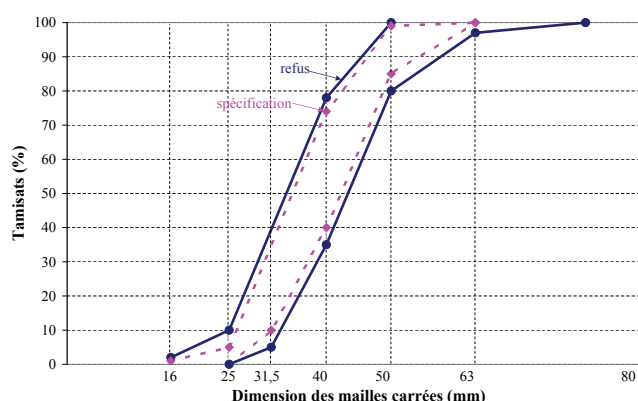


Figure 1.4 – Fuseaux granulométriques du ballast ferroviaire (Afnor, 2003)

On commence par déterminer les pourcentages de sols grenus et fins de la façon suivante (classification géotechnique des sols grossiers des Laboratoires des Ponts et Chaussées) :

- sol grenus : plus de 50 % des éléments sont $>$ à $80 \mu m$.
- sols fins : plus de 50 % des éléments sont $<$ à $80 \mu m$.

Cette classification n'est pas normalisée mais permet de définir si un matériau est considéré comme un matériau grossier ou pas.

1.2.3 Forme

Les éléments de ballast sont de forme polyédrique et à arêtes vives. Ils doivent être conformes aux prescriptions de la longueur « aiguille » et de l'épaisseur « plat ».

Le contrôle des éléments longs ou aiguilles doit être réalisé dans leur plus grande longueur sur les éléments passant au tamis de 50 mm. La valeur de la cote L du gabarit de contrôle est de 92 mm. La masse relative des matériaux de longueur supérieure à L par rapport à la masse totale des matériaux passant au tamis de 50 mm ne doit pas excéder 7 %.

Le coefficient d'aplatissement fait référence à la norme NF EN 933-3 de 2012 ([Afnor, 2012](#)) et doit être défini dans les spécifications techniques de la voie en question ([Infrabel, 2007](#)). Concernant les seuils de coefficient d'aplatissement, la norme NF F 53-695 ([Afnor, 1996](#)) remplace la norme expérimentale XP 18-561 qui n'est plus en vigueur.

1.2.4 Propreté et constante diélectrique

La circulation répétée des trains provoque une dégradation du ballast en modifiant la taille des grains et des contacts et en générant une couche intermédiaire constituée d'un mélange ballast/sous couche. Le ballast doit être nettoyé de toute matière étrangère afin qu'il conserve de bonnes caractéristiques mécaniques. La masse relative des éléments passant au tamis à mailles carrées de 1,6 mm ne doit pas excéder 0,5 %. La valeur limite a été fixée à 0,8 %. D'autres paramètres conduisent également à la pollution du ballast (figure 1.5). L'étude nord américaine à l'université du Massachusetts de [Selig & Waters \(1994\)](#) a permis de mettre en évidence les principales causes de pollution du ballast. Sur 100 % de fines présentes dans le ballast :

- 76 % proviennent de la fracturation du ballast (action mécanique : mise en œuvre, trafic, bourrage, stabilisation, fracturation liée aux conditions climatiques (gel/dégel) et aux pluies acides),
- 13 % de l'infiltration de la sous-couche – migration de particules de ballast,
- 7 % de l'infiltration par la surface (pollution des trains, poussières atmosphériques, pluies chargées en matières),
- 3 % de l'infiltration de la couche de forme,
- 1 % de l'usure de la traverse.

Cette répartition est propre aux structures ferroviaires américaines. En effet, les conditions de réalisation, de maintenance pouvant être différentes dans d'autres pays, les fines du ballast peuvent ainsi provenir majoritairement de la surface.

1.2 Le Ballast : caractéristiques et méthodes d'auscultation

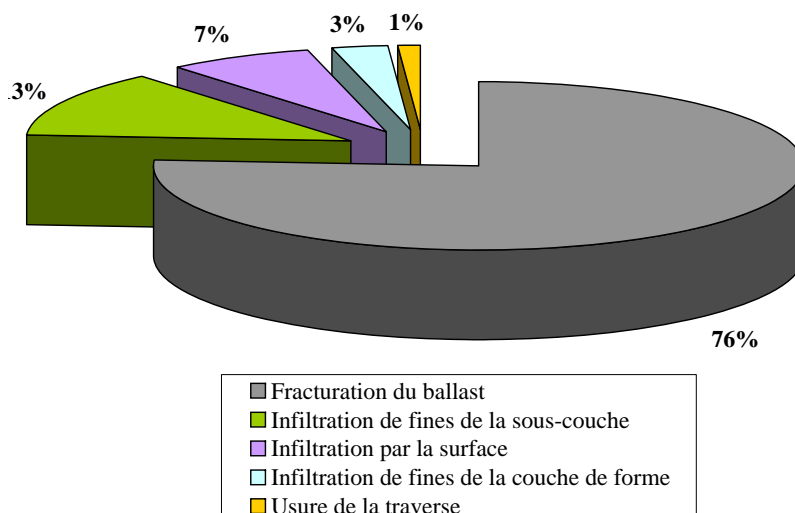


Figure 1.5 – Différentes sources de pollution du ballast (Selig & Waters, 1994)

Suite aux opérations de maintenance et à la vie d'une voie ferrée (matériaux transportés, usure des éléments des véhicules, remontée de fines), les vides du ballast sont amenés à être comblés par des fines. La pollution du ballast conduit à une augmentation des cycles de bourrage (Annexe A.6) en fonction du temps. La figure 1.6 illustre bien ces propos par la réduction du trafic cumulé entre chaque cycle de bourrage en fonction du temps. Les déformations limites acceptables pour la sécurité des usagers sont atteintes plus rapidement avec une pollution du ballast par des fines. Ce phénomène empêche un bon drainage des eaux météoriques et diminue les forces de contact entre les grains, ce qui conduit à une dégradation des caractéristiques mécaniques du ballast en générant des tassements (Selig & Waters, 1994).

Les particules encrassant le ballast augmentent la rigidité du ballast. Néanmoins, ceci est vrai lorsque les éléments grossiers de ballast forment le squelette. La perte de performance apparaît lorsque les matériaux d'encrassement contiennent des fines limono-argileuses. Ces fines couplées à l'eau météorique conduisent à une érosion hydraulique de la traverse et du ballast. En effet l'action des sollicitations du passage ferroviaire exercée sur la traverse en contact avec un mélange eau/fines conduit à dégrader la traverse et le ballast (figure 1.7).

Des défauts géométriques peuvent être mesurés sur la voie au moyen des voitures Mauzin ¹ (annexe A.1). Il est important de maintenir des caractéristiques géométriques de voie ainsi que des constituants de bonne qualité.

1. nom tiré de son inventeur André Mauzin, ingénieur en chef de la SNCF et directeur de la Section d'essais et Recherche de la SNCF (Direction du Matériel) jusqu'en 1966

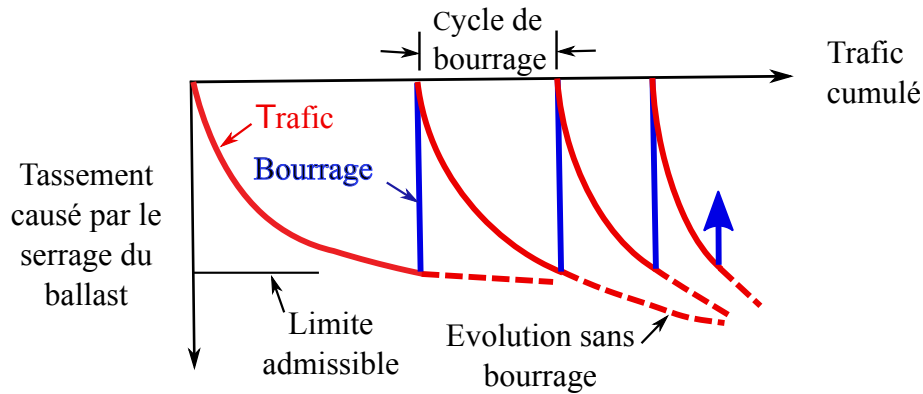


Figure 1.6 – Effet du colmatage du ballast sur la fréquence des cycles de bourrage

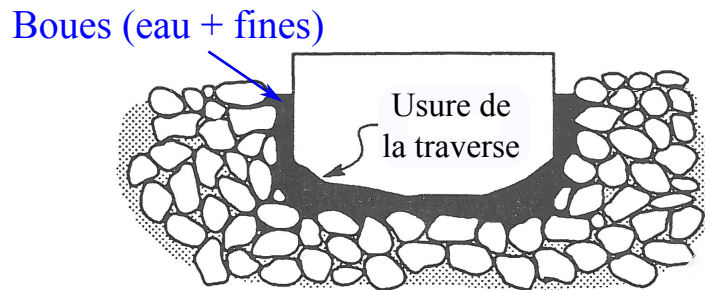


Figure 1.7 – Érosion hydraulique de la traverse

Aussi, il peut être réalisé deux types de maintenance sur le ballast (annexe A.6) :

- bourrage mécanique du ballast pour atteindre une bonne géométrie de la voie,
- renouvellement du ballast pour garantir un bon drainage des eaux météoriques.

Par ailleurs, l'état du ballast peut être évalué par le pourcentage en poids de fines (limon ou argile avec un $D_{max} < 0,075$ mm) à partir de la courbe granulométrique. Le D_{max} en France est fixé à 0,08 mm.

Des indicateurs ont été définis afin d'estimer le taux de pollution du ballast ; les plus communément utilisés d'entre eux sont l'indice de colmatage (F_I : fouling index) et le pourcentage de vides contaminés (PVC : Percentage Void Contamination).

L'indice de colmatage F_I nommé "Fouling Index" est calculé à partir des courbes granulométriques. Il permet de connaître le niveau de pollution du ballast pour éventuellement intervenir sur une opération de nettoyage et de

1.2 Le Ballast : caractéristiques et méthodes d'auscultation

renouvellement (Selig & Waters, 1994; Indraratna et al., 2011).

$$F_I = P_4 + P_{200} \quad (1.1)$$

avec P_4 , le pourcentage de matériaux passant à 4,75 mm et P_{200} , le pourcentage de matériaux passant à 0,075 mm.

La figure 1.8 présente l'évolution de la courbe granulométrique de ballasts dont l'indice F_I varie.

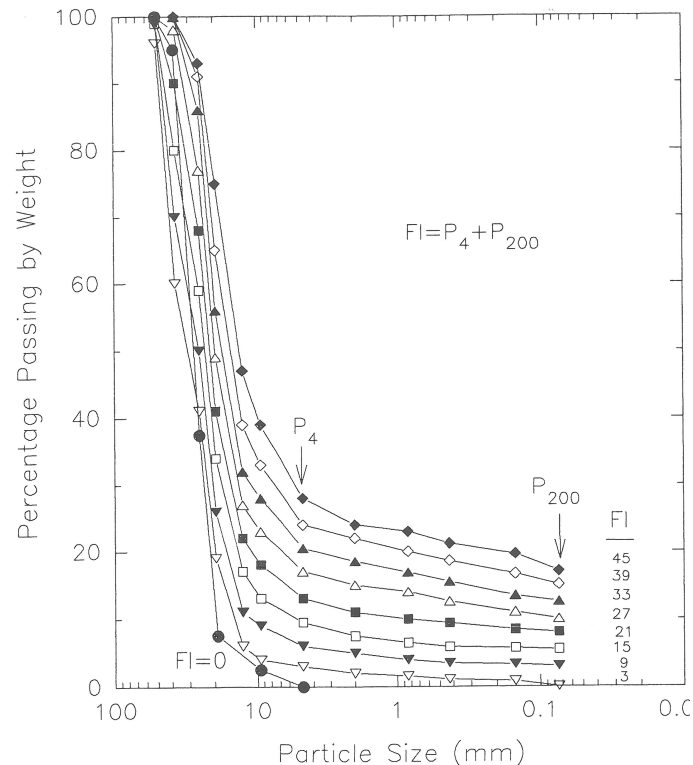


Figure 1.8 – Courbes granulométriques représentatives d'un ballast propre à pollué avec un indice de colmatage F_I variant de 3 à 45 (Selig & Waters, 1994)

L'indice nommé TRC pour "Taux Relatif de Colmatage du ballast" est un nouvel indicateur prenant plus en compte la nature et la gradation du matériel comblé. Une classification de l'état de propreté a été réalisée en fonction de la granulométrie des particules extraites (Selig & Waters, 1994). Le tableau 1.2 présente les catégories de colmatage du ballast en fonction des valeurs des indicateurs F_I , PVC et TRC.

Le radar est un autre outil performant pour caractériser la présence de fines dans le ballast. De nombreux auteurs font référence à cet essai in situ sur voie ballastée pour déterminer l'encrassement du ballast ².

2. <https://www.fra.dot.gov/Elib/Document/1248>

Tableau 1.2 – Catégories de colmatage en fonction de trois indicateurs de colmatage du ballast

Différentes catégories	F_I	PVC (%)	TRC (%)
Propre	<1	<2	<2
Moyennement propre	1 to <10	2 to <9,5	2 to <10
Moyennement colmaté	10 to <20	9,5 to <17,5	10 to <20
Colmaté	20 to <40	17,5 to <34	20 to <50
Fortement colmaté	≥ 40	≥ 34	≥ 50

Ces travaux montrent que le GPR³, après un paramétrage préalable permettant de fixer l’orientation des antennes et de la gamme d’émission en fréquence, permet sur des structures ballastées :

- de détecter l’interface ballast/ sous couche,
- d’étudier les anomalies de la voie.

Cette méthode fait intervenir la constante diélectrique notée ε , une valeur complexe exprimée généralement en F/m. Elle dépend essentiellement de la nature de la roche. Pour des roches comme le ballast constituées de quartzite, elle peut être comprise entre 4 et 9 ($\varepsilon \in [4,9]$) (Fauchard et al., 2013). Les particules fines plus argileuses conduisent à augmenter la constante diélectrique en rendant le ballast dispersif.

Gallagher et al. (1999); Clark et al. (2001); De Bold, R. et al. (2007) ont étudié la réponse du radar sur une section de voie expérimentale de 10 m avec trois états d’encrassement (ballast propre, ballast moyennement et très pollué). Ces études montrent la faisabilité d’utiliser le GPR pour visualiser la pollution du ballast. Les caractéristiques diélectriques du ballast sont déterminées à l’aide d’antennes de 500 à 900 MHz. Les résultats sont de meilleure qualité avec une antenne de 500 MHz. Dans ces travaux, la constante diélectrique du ballast propre est de 3 et celle du ballast pollué de 4,3.

Anbazhagan et al. (2011) ont couplé quatre antennes différentes (500, 800 MHz, 1,6 et 2,3 MHz) sur un modèle de voie ferrée avec différents taux et types d’encrassement. Il s’avère, contrairement aux travaux cités précédemment, que l’antenne de 800 MHz est plus adaptée pour évaluer l’état d’en-

3. Ground Penetrating Radar

1.2 Le Ballast : caractéristiques et méthodes d'auscultation

crassement du ballast. Cette méthode permet de bien évaluer la profondeur d'encrassement mais ne donne pas de résultats quantifiables à la différence des méthodes sismiques plus complexes à mettre en œuvre.

Enfin, les travaux de [Roberts et al. \(2006\)](#); [Al Qadi, Imad L. et al. \(2008\)](#) comparent les données obtenues avec des antennes de 1 et 2 GHz sur un tronçon de voie ferrée. La différence de texture est apparemment plus visible avec une antenne de 2 GHz.

1.2.5 Résistance mécanique

La catégorie du ballast est définie en tenant compte de la résistance à l'usure (MDE pour gravillons de soufflage – MDA pour ballast) définie au moyen de l'essai micro-Deval adapté au ballast et de la résistance à la fragmentation (LA) par chocs déterminées au moyen de l'essai Los Angeles. Le tableau 1.3 présente les différentes catégories de ballast en fonction de la voie pour laquelle il est utilisé. On distingue les lignes à grande vitesse (LGV), les voies classiques et les voies à usage spécifique. Les voies du réseau classique portent généralement des trains :

- de voyageurs avec une vitesse ≤ 200 km/h, 20 t de charge par essieu,
- de marchandises avec une vitesse ≤ 100 km/h, 22,5 t de charge par essieu.

Tableau 1.3 – Exigences et valeurs limites de résistance mécanique des ballasts en fonction du type de voie ([Afnor, 1996](#))

Catégorie	Critères	LA	MDA	LA+MDA
LGV	Exigences	≤ 19	≤ 6	$LA+5MDA \leq 44$
	Valeurs limites	≤ 22	≤ 8	$LA+5MDA \leq 54$
Réseau classique	Exigences	≤ 22	$\leq 8,5$	$LA+2MDA \leq 33$
	Valeurs limites	≤ 25	$\leq 10,5$	$LA+2MDA \leq 37$
Usage spécifique	Valeurs précisées dans le contrat par le client			

La caractérisation des sols grossiers nécessite l'utilisation d'essais spécifiques de grandes dimensions. Pour étudier le comportement mécanique des sols grossiers et estimer leur résistance au cisaillement, il convient que la dimension de l'éprouvette soit équivalente à 10 fois la taille de l'élément de base. Il existe deux approches qui utilisent :

- les essais in situ (pressiomètre, phicomètre, boîte de cisaillement in situ) ;
- les essais de laboratoire de grande dimension (boîte de cisaillement direct, appareil triaxial).

Il faut noter que la droite de Mohr Coulomb donne une cohésion c du ballast proche de 0 mais peut être positive suite à l'enchevêtrement des particules et que la résistance au cisaillement τ de ce matériau décroît avec l'augmentation de fines.

Des études en laboratoire ([Corneille, 2007](#)) ont été réalisées sur du ballast 20/31,5 mm utilisé dans les colonnes ballastées. La cohésion et l'angle de frottement interne du ballast, obtenus par des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande (300 x 300 mm) ont pour valeur 0 kPa et 40 degrés. Ces caractéristiques doivent être fonction du compactage du ballast.

1.2.6 Raideur

La raideur de chaque élément de ballast est donnée par :

$$k_b = \frac{eE_b \tan \alpha (l_e l_s)}{\ln \frac{l_e(l_s + 2h_b \tan \alpha)}{l_s(l_e + 2h_b \tan \alpha)}} \quad (1.2)$$

où E_b est le module élastique du ballast, les autres paramètres étant des données géométriques relatives aux blocs de ballast ([Zhai et al., 2004](#); [Kouroussis, 2009](#)).

La raideur du ballast varie dans la littérature entre 25 et 500 MN/m. En effet, ce paramètre est fortement lié aux caractéristiques de la sous-couche ferroviaire (chapitre [4.1](#)).

1.2.7 Module d'Young

Le module d'élasticité résiliente du ballast, défini comme le rapport du déviateur de contrainte sur la partie élastique de la déformation axiale, vaut 450 MPa. Il est invariant avec la fréquence du chargement. ([Federal Railroad Administration, 1977](#); [Guérin, 1996](#)) ont montré que le module augmente lorsque l'échantillon de ballast se densifie et qu'il diminue en présence de fines. Le module de déformation du ballast varie dans la littérature entre 8 et 630 MN/m.

1.2.8 Amortissement

Dans la littérature, l'amortissement du ballast varie de 12 à 300 kNs/m⁴. Le ballast est ainsi modélisé en considérant chaque particule de ballast. Certains auteurs ([Zhai et al., 2004](#); [Kouroussis, 2009](#)) proposent des paires de ressorts-amortisseurs travaillant en cisaillement.

4. abréviation du coefficient d'amortissement correspondant à des kN/m/s

1.2.9 Porosité, compacité

Le serrage d'un matériau granulaire tel le ballast par un moyen mécanisé (stabilisatrice ou compacteur) ou par la circulation répétée des trains conduit à la réduction du volume des interstices entre les particules. Les phases solide et liquide n'étant pas compressibles, le compactage a un effet uniquement sur la phase gazeuse par la réduction des vides d'air en réarrangeant les éléments du squelette. La porosité n est le rapport du volume des vides remplis d'eau ou d'air avec le volume total (équation 1.3). L'indice des vides e est le rapport du volume des interstices (pores) sur le volume des particules (équation 1.4). L'indice des vides du ballast est supérieur à 0,7 (Paderno, 2010).

$$n = \frac{V_V}{V} = \frac{e}{1 + e} \quad (1.3)$$

$$e = \frac{V_V}{V_S} = \frac{n}{1 - n} \quad (1.4)$$

avec :

- V_V le volume des vides,
- V_S le volume des particules,
- V le volume total.

Les différents paramètres (pressions, saturations, températures, fréquences, déformations) influençant la propagation des ondes dans les milieux poreux sont décrits dans Bourbié et al. (1986). Les mécanismes de propagation dans les milieux poreux sont bien décrits dans cet ouvrage.

La difficulté de compactage et la résistance des sols grossiers sont influencées par l'étalement de la granulométrie (XP P94-011, Afnor (1999)). La prise en compte de cette grandeur se fait à travers deux indicateurs :

avec d_{10} , d_{30} , et d_{60} , dimension des particules correspondant à 10, 30 et 60% du passant cumulé sur la courbe granulométrique

La masse volumique sèche varie dans la littérature entre 1,3 et 1,8 t/m³.

Sur la voie ferrée, les méthodes suivantes sont utilisées pour étudier l'état physique du ballast Selig & Waters (1994) :

- essai de densité du ballast (BDT),
- essai de chargement à la plaque (PLT),
- essai de poussée latérale sur la traverse (LTPT).

L'essai de densité du ballast (BDT, figure 1.9) permet de déterminer *in situ* la densité. Pour cela, il convient de déterminer le volume d'eau équivalent à une quantité de ballast excavé.

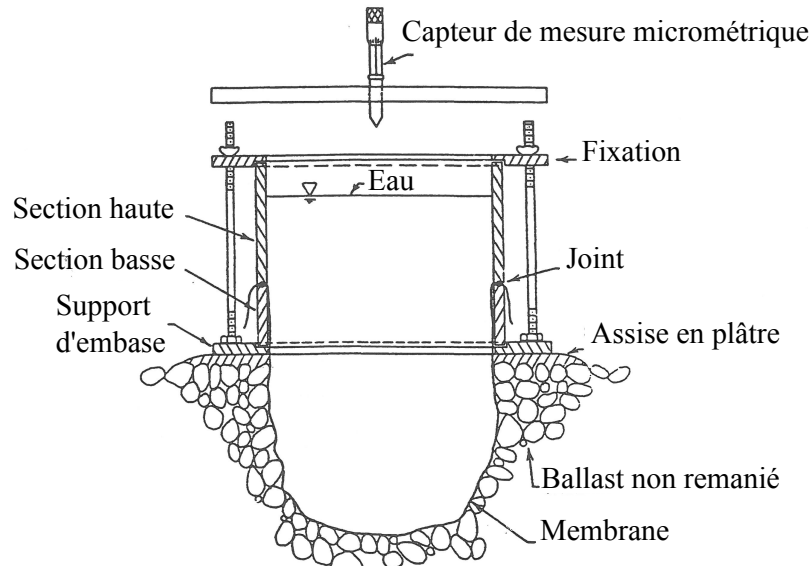


Figure 1.9 – Essai de densité in situ du ballast [Selig & Waters \(1994\)](#)

L'essai de chargement à la plaque (PLT, figure 1.10) détermine la rigidité verticale du ballast comme indicateur de l'état physique du ballast. Une plaque en acier de 12,7 cm est posée sur le ballast en utilisant du plâtre. La plaque est ensuite chargée verticalement. La force créée par le vérin hydraulique couplée à la mesure de déformation de la plaque donne une mesure de rigidité qui est prise comme un indicateur.

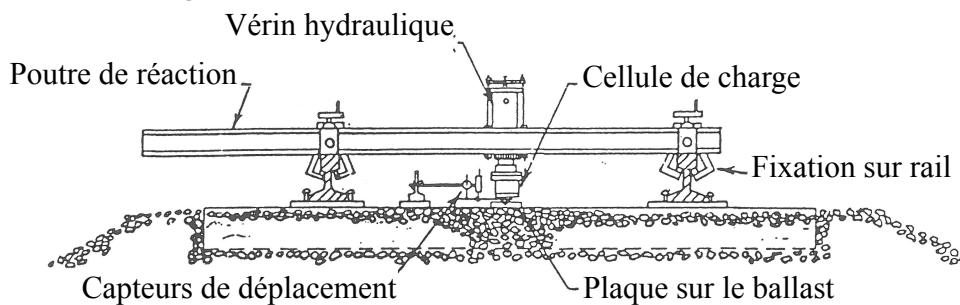


Figure 1.10 – Essai de chargement à la plaque [Selig & Waters \(1994\)](#)

1.3 Sollicitations et répartition des charges ferroviaires

L'essai de poussée latérale sur la traverse (LTPT, figure 1.11) détermine la résistance de la traverse au frottement généré par le ballast. Cette résistance permet ainsi de donner un indicateur de l'état du ballast.

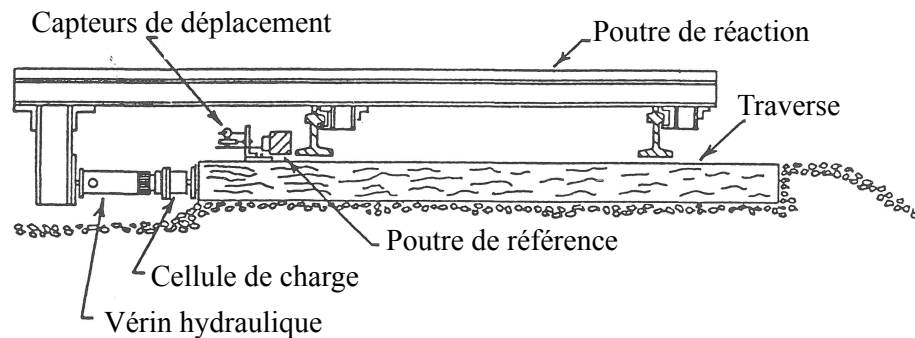


Figure 1.11 – Essai de poussée latérale sur la traverse [Selig & Waters \(1994\)](#)

1.3 Sollicitations et répartition des charges ferroviaires

Les voies ferrées sont soumises à des sollicitations statiques liées au poids des trains et à des sollicitations dynamiques dues aux freinages et accélérations des trains et aux irrégularités des contacts rails-roues. La fréquentation des voies est très élevée et augmente avec les nouveaux matériels automatisés de détection de la signalisation (l'ERTMS ou le TMV40, [Ben Slimen, Mohamed Nedim \(2009\)](#)). Par exemple, la ligne TGV Paris-Lyon autorise 12 à 16 trains à l'heure. Les conditions climatiques, la pollution ainsi que la maintenance sont autant d'agressions qui conduisent à la réorganisation des grains et à des défauts géométriques.

Lors du passage d'un train, les efforts infligés aux rails par les essieux sont transmis aux traverses environnantes. La répartition des bogies ferroviaires donne un signal caractéristique en « double M », dont les grandeurs principales pour les TGV lancés à 300 km/h et un travelage de 60 cm, sont représentées sur la figure 1.12.

La transmission de la charge de la roue sur les traverses est fonction du type et de l'espacement des traverses. La charge est répartie équitablement entre les rails gauche et droit (environ 90 kN par rail pour un TGV avec une charge à l'essieu de 180 kN). Dans le cas d'une structure de faible raideur, 11 traverses peuvent être sollicitées, alors que seulement 5 traverses sont mises à contribution dans le cas d'une structure à raideur élevée. Un modèle de

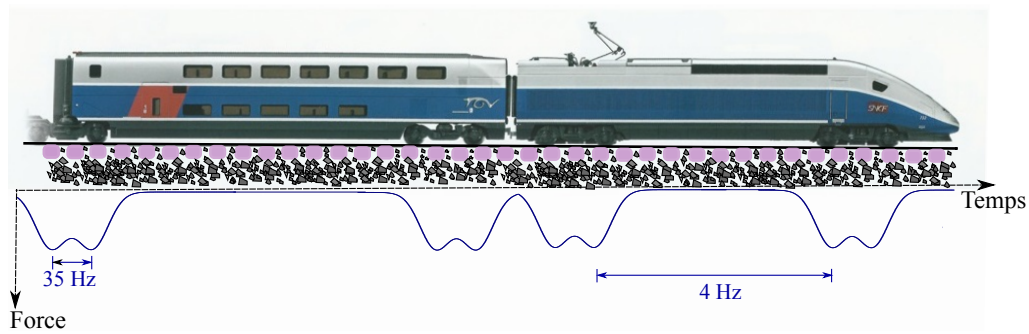


Figure 1.12 – Forme et fréquences des sollicitations au passage d'un TGV

répartition de la charge pour 5 traverses de 5 %, 20 % et 50 % (sur la traverse principale) est retenu pour les convois de type TGV selon le schéma défini sur la figure 1.13.

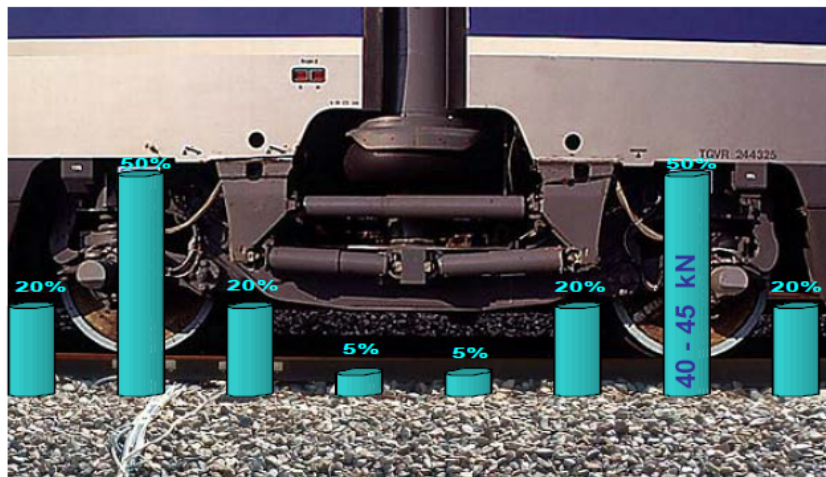


Figure 1.13 – Répartition statique théorique de la reprise de charges par les traverses [Schmitt et al. \(2006\)](#)

Ainsi, les traverses peuvent être sollicitées par des charges de l'ordre de 90 kN pour les TGV (charge à l'essieu TGV de 180 kN), et de l'ordre de 125 kN pour le fret (charge à l'essieu du train fret de 250 kN). [Profillidis \(1983\)](#) a calculé la distribution de la charge appliquée sur les traverses par la méthode des éléments finis. Les pourcentages moyens de la charge de 20 t/essieu répartis sur la traverse centrale et les deux traverses adjacentes d'un même côté sont de 39, 23,5 et 7 %.

La pression exercée sur les couches sous-jacentes est déterminée dans la plupart des cas par la théorie de l'élasticité de Boussinesq et la méthode semi-empirique de Doyle ([Trinh, 2011](#)).

La structure ferroviaire subit également des efforts latéraux dans les courbes.

Ces efforts peuvent représenter jusqu'à 70 % de la charge verticale, soit environ 190 kN dans le cas du fret.

1.4 Méthodes d'inspection des voies ferrées

Les lignes de voies ferrées sont des ouvrages de longue durée de vie. Dans certains cas, elles peuvent dater de plus de 100 ans. Dans ce contexte, certains composants doivent inévitablement être remplacés, surtout ceux de l'infrastructure et de la sous-couche ferroviaire⁵, d'autant que les exigences à la construction de ces voies ne sont plus les mêmes avec l'augmentation des vitesses et des charges en circulation.

Dans ce contexte de vieillissement des voies, l'exploitant des voies doit garantir pour les usagers une bonne qualité de service ainsi qu'un bon niveau de sécurité.

Pour répondre à ce besoin, un contrôle régulier de l'ensemble du réseau ferroviaire est effectué. Il permet de détecter les défauts géométriques (annexe A.1) et ainsi réparer si besoin tout problème constaté. Lorsque ces derniers sont trop importants, l'exploitant procède au bourrage du ballast (annexe A.6) permettant ainsi d'atteindre des niveaux de déformations moins importants. Lorsque la voie a été fortement circulée, il procède au renouvellement complet de la voie. Cette opération de renouvellement de voie est très coûteuse (2 millions d'euros pour renouveler un kilomètre de voie) et engendre en complément une indisponibilité de service de ces dernières (annexe A.6.3).

Guérin (1996); Meier Hirmer, Carolina (2009) ont étudié le comportement du ballast ferroviaire pour intégrer ces connaissances dans la stratégie de maintenance et de rénovation des voies. Paderno (2010) a étudié la dégradation du ballast suite au processus de bourrage et de trafic en fonction des caractéristiques du ballast et la rigidité de l'infrastructure dans le but de diminuer les effets négatifs du bourrage et d'augmenter la durée de vie par cette connaissance.

Un dispositif à échelle réduite a été créé dans le cadre des travaux de Foret et al. (2003) pour étudier l'influence de la fréquence de sollicitation du bourrage.

Barberon (2005); Griboulet (2006) montrent l'importance économique de solutions innovantes à la fois en termes de précision et de rapidité. L'installation d'un chariot pourvu d'une instrumentation de mesures automatisées conduit à réaliser un bourrage guidé sur une géométrie définie. Cet entretien peut être remplacé par le soufflage pneumatique du ballast qui présente a priori moins de dégradation pour les granulats par rapport au bourrage traditionnel (annexe A.6.2, Zarembski & Newmani (2008)).

5. ou substructure

Le diagnostic peut faire l'objet d'essais ponctuels tel le pénétromètre "Panda" (<http://www.sol-solution.com/panda/27>) et l'essai d'excitation au marteau (annexe A.5). Une étude sur la pertinence de l'essai "Panda" dans le ballast a été faite par [Quezada \(2014\)](#) indiquant que la variabilité des mesures nécessite un nombre conséquent de mesures afin d'aboutir statistiquement à la valeur moyenne.

Des essais à grand rendement comme :

- le radar GPR (annexe A.3) permettent d'ausculter l'épaisseur en continu de la voie⁶ et la pollution en fines du ballast [Gallagher et al. \(1999\)](#); [Forde et al. \(1999\)](#); [Roberts et al. \(2006\)](#); [Anbazhagan et al. \(2010\)](#); [De Bold,Robert \(2011\)](#); [Anbazhagan et al. \(2011\)](#),
- la voiture Mauzin, l'Iris 320, le véhicule de chargement de la voie (annexe A.1) permettant de définir les défauts géométriques du tracé de la voie,
- le RSMV (véhicule de mesure de rigidité en roulant) et le portancemètre ferroviaire mesurant la raideur globale de la voie

Cependant, ces méthodes de mesure de rigidité des voies intègrent toute la structure en déterminant une raideur en surface de la structure ou en déterminant un bassin de déformation de la voie. Le principe des différentes méthodes actuellement utilisées est décrit en annexe A.1. Il serait plus intéressant pour l'exploitant de disposer de méthodes d'auscultation non destructives à grand rendement permettant de quantifier chaque couche de l'infrastructure de la voie ferrée, et ainsi détecter les défauts de la voie sur lesquels agir.

Au stade actuel, l'exploitant a besoin de connaître l'état de la structure de la voie. Cela nécessite notamment de mieux connaître le comportement du ballast. C'est pourquoi le paragraphe 1.5 décrit des méthodes faisant intervenir l'étude de la propagation d'ondes dans la structure de la voie. Ce type de méthodes d'auscultation non destructive est encore peu utilisée dans le cas du ballast.

1.5 Méthodes d'auscultation des voies ferrées et du ballast par propagation d'ondes

1.5.1 Relation vitesse-porosité et autres paramètres

Les vitesses sismiques sont influencées par les caractéristiques du milieu. Les notions fondamentales peuvent être trouvées dans le livre [Bourbié et al. \(1986\)](#). Des études en laboratoire ([Gardner et al., 1974](#); [Bourbié et al., 1986](#); [Berge,Patricia A. & Bonner,Brian P., 2002](#)) ont mis en évidence l'augmentation des vitesses avec la densité, la pression exercée, la saturation en fluide

6. <https://www.fra.dot.gov/Elilib/Document/1248>

1.5 Méthodes d'auscultation par propagation d'ondes

et la résistivité (Kouame et al., 2011), et la diminution avec la teneur en tourbe/argile (Castagna, Gordon B. et al., 1985) et la porosité. Des études (Ezersky & Goretsky, 2014) ont été menées sur des échantillons salés de sol provenant de la Mer Morte pour définir l'inter-relation entre les paramètres vitesse-résistivité et porosité-perméabilité.

Castagna, Gordon B. et al. (1985); Knackstedt et al. (2005) ont testé différentes porosités n de sable plus ou moins argileux et de roches silo-clastiques⁷ qu'ils ont simulés au moyen de modèles numériques élastiques. Les résultats liant la vitesse à la porosité montrent que plus la porosité est élevée plus la vitesse de propagation est faible. Les lois tirées de ces études en laboratoire sont les suivantes :

$$V_S = 0.862 V_P - 1170 \quad (1.5)$$

$$V_P = 5810 - 9420 n - 2210 V_{cl} \quad (1.6)$$

$$V_S = 3890 - 7070 n - 2040 V_{cl} \quad (1.7)$$

avec V_{cl} la teneur volumique d'argile variant entre 0 et 1.

Une relation lie la porosité à la vitesse dans une roche consolidée fracturée suivant la loi de Wyllie (Chapellier & Mari, 1999) :

$$\frac{1}{V_R} = \frac{n}{V_f} + \frac{(1-n)}{V_{ma}} \quad (1.8)$$

avec :

- n la porosité [%],
- V_P la vitesse de propagation des ondes de compression mesurée dans la roche [m/s],
- V_S la vitesse de propagation des ondes de cisaillement mesurée dans la roche [m/s],
- V_f la vitesse de propagation dans le fluide imprégnant la roche [m/s],
- V_{ma} la vitesse de propagation dans la matrice [m/s].

1.5.2 Propagation à travers le ballast

L'étude expérimentale de Zagyan & Fairfield (2002) détermine les vitesses des ondes de cisaillement du ballast en fonction du nombre de passes de compactage. Il apparaît que la vitesse augmente avec le compactage jusqu'à atteindre un seuil. Il existe une variabilité de la mesure de vitesse en fonction

7. càd roches siliceuses fracturées

de la position des capteurs, indiquant des phénomènes complexes dans ce matériau granulaire. Pour une masse volumique allant de 1,6 à 2 t/m³, la vitesse des ondes de cisaillement varie de 170 à 300 m/s sur une gamme en fréquence allant de 50 à 170 Hz.

Hwang & Park (2014) ont proposé une analyse en ondelettes à partir de la méthode des ondes de surface pour déterminer l'état de serrage du ballast. Le déphasage et le champ fréquentiel sont ainsi définis en fonction du temps pour un cycle de sollicitation. Les courbes de dispersion de cette expérimentation avec un ballast de 1,7 t/m³ présentent une vitesse de phase de 50 à 250 m/s sur une gamme en fréquence allant de 100 à 250 Hz, ce qui correspond à une profondeur de pénétration des ondes de 20 cm à 1 m. Cette analyse paraît simple en théorie pour déterminer le déphasage mais peut devenir complexe dans la réalité étant donné que les signaux sont souvent bruités.

1.5.3 Propagation à travers la structure de la voie ferrée

Pérez Santisteban, Itziar et al. (2011) ont comparé différentes méthodes sismiques (ReMI, SASW, PS-logging) sur la structure d'une voie nouvelle en Espagne. Les résultats des méthodes ReMI et SASW sont proches (valeurs de vitesse de cisaillement V_S de l'ordre de 250 m/s pour des épaisseurs inférieures au mètre) tandis que la méthode de PS-logging donne des valeurs plus conséquentes d'environ 350 m/s.

Stark et al. (2013) présentent les orientations de l'administration fédérale sur la voie ferrée de l'Illinois (FRA) pour l'étude de la propagation des ondes sismiques dans les structures ferroviaires afin de prédire l'état de la voie et les intervalles périodiques de maintenance en instrumentant le ballast au moyen de géophones.

Clayton et al. (2006) expliquent les techniques non destructives de la géophysique, en particulier la méthode CSW (onde de surface continue) et SASW. Cette technique permet de déterminer les modules de cisaillement des différentes couches de la voie ferrée en instrumentant la sous-couche ferroviaire et en la sollicitant au moyen d'un vibreur avec des fréquences variant de 10 à 150 Hz (méthode CSW) et au moyen d'un marteau (méthode SASW). Cette dernière méthode se révèle plus rapide grâce au contenu fréquentiel de la sollicitation au marteau.

wha Lee et al. (2006) focalisent leur étude sur la technique d'analyse spectrale des ondes de surface en expliquant le principe du traitement et en donnant des résultats de profils de vitesse des ondes de cisaillement sur des profondeurs allant jusqu'à 4 m. Ces mesures sont faites à partir de la sous-couche.

Gunn et al. (2006) réalisent une étude d'ondes de surface sur voie ferrée avec des mesures à la surface du ballast. La différence de phase mesurée sur

1.5 Méthodes d'auscultation par propagation d'ondes

le ballast est de 300 ° avec une fréquence de 200 Hz, une raideur inversée de 50 MPa et une résistance à la pénétration au cône de 90 MPa.

1.5.4 Étude du ballast avec la réponse de la traverse

Les articles [Lam & Wong \(2011\)](#); [Lam et al. \(2012\)](#) montrent la faisabilité de mesures vibratoires sur traverses en béton pour détecter les dommages du ballast à partir d'un test de sollicitation au marteau. La réponse modale dépend néanmoins de plusieurs facteurs tels la détérioration de la traverse elle-même, les défauts du rail, de l'élastomère sous la traverse et les facteurs environnementaux comme la température et l'humidité. Tous ces paramètres doivent ainsi rentrer en considération pour la compréhension de cette mesure modale.

1.5.5 Modélisation du ballast

[Huang & Chrismer \(2013\)](#) ont modélisé le comportement du ballast sous des chargements de trains à des vitesses variant de 20 à 100 m/s. Les résultats montrent que la vitesse des trains conduit à des tassements importants du ballast. Les paramètres du ballast sont les suivants :

- module d'Young de 300 MPa,
- coefficient de Poisson de 0,4,
- amortissement du ballast de 30 MNs/m ,
- module du ballast de 160 MN/m,
- masse volumique de 2 t/m^3 .

Le ballast peut être modélisé à partir de modèles (cf. synthèse dans le paragraphe [4.2.1.4](#)) et à partir de modèles discret (cf. paragraphe [4.2.2.3](#)).

1.5.6 Propagation acoustique

[Imbert \(2013\)](#) étudie la réponse acoustique d'un milieu granulaire saturé afin de recueillir des informations sur les fonds marins (localisation, géométrie, composition) en étudiant la variation de la réponse acoustique liée au diamètre des grains.

En effet, l'approche expérimentale de [Legonidec & Gibert \(2007\)](#) a permis de mettre en évidence que la réponse acoustique dépend fortement du rapport entre la longueur d'onde incidente et le diamètre des grains. L'approche expérimentale de [Legonidec & Gibert \(2007\)](#) a permis de mettre en évidence le fait que la réponse acoustique dépend fortement du rapport entre la longueur d'onde incidente et le diamètre des grains.

[Brunet \(2006\)](#) étudie la propagation d'ondes ultrasonores dans les milieux granulaires denses confinés et sous contrainte, secs et faiblement mouillés.

Ce travail a porté sur l'étude du liquide interstitiel sur le comportement de milieux granulaires faiblement mouillés, l'étude de la propagation non linéaire des ondes acoustiques de forte amplitude dans un milieu granulaire.

Une étude de la propagation des ondes de surface a également été réalisée dans les premiers centimètres de béton par [Chekroun et al. \(2008\)](#). Le désordre pour ce type de milieu provient de l'hétérogénéité des forces de contact inter-grains. Lorsque la taille des grains est très inférieure à la longueur d'onde, les ondes sont dites cohérentes et les ondes se propagent comme dans un milieu élastique continu. Pour des longueurs d'ondes proches de la taille des grains, les ondes subissent de multiples réflexions. Ce régime diffusif a été mis en évidence par [Margerin et al. \(1998\)](#).

1.5.7 Écoulements granulaires

La thèse de [Dupuy \(2011\)](#) décrit les milieux biphasiques (sol+gaz ou sol+liquide) avec la théorie des ondes sismiques de Biot et Gassmann avec la résolution des équations différentielles en utilisant la méthode Galerkin. D'autres cas sont étudiés en considérant des milieux biphasiques à double porosité.

Les travaux de [De Barros, Louis et al. \(2010\)](#) consistent à développer une technique d'inversion pleine échelle afin d'estimer la porosité, la perméabilité, les propriétés des fluides interstitiels et les paramètres mécaniques de la propagation des ondes sismiques dans un milieu rempli de fluide selon le modèle de Biot.

Les expérimentations de [Bachrach & Nur \(1998\)](#) utilisent les équations de Gassmann afin d'étudier les réflexions d'ondes mises en évidence sur les interfaces d'écoulements de fluide, et de saturation du sable pendant les marées.

1.6 Conclusion

Le bourrage est une procédure d'entretien, utilisée pour rétablir la position géométrique des voies ferrées ballastées. En effet, le trafic et les vitesses des trains conduit à un réarrangement des granulats de ballast et à une dégradation de ces derniers. Le comportement des voies varie fortement avec l'augmentation de la vitesse car elle ne suit pas une loi linéaire. Un entretien périodique doit être réalisé afin de garantir la sécurité et le confort des usagers. Dans ce contexte, il est essentiel de mettre en œuvre des solutions d'auscultation innovantes, à la fois en termes de précision et de rapidité d'intervention.

Bien qu'utilisé depuis longtemps, le ballast des voies ferrées a un comportement encore mal connu. Les méthodes d'auscultations couramment utilisées trouvent leurs limites, car elles fournissent un résultat relatif à l'ensemble de l'infrastructure, et non à chaque couche. Par ailleurs la méthode radar (GPR),

1.6 Conclusion

très intéressante et facile à mettre en oeuvre, donne accès à des données qualitatives plutôt que quantitatives.

Les méthodes sismiques se révèlent donc une alternative intéressante dans ce contexte : en effet, les ondes engendrées par le train pourraient servir de source et de récepteur pour la caractérisation de l'état du ballast. En préalable à ces recherches futures, il est nécessaire de faire avancer la connaissance des milieux granulaires dans un contexte simplifié sans panneau de voie ni charge roulante et avec des sources de sollicitation de faible énergie, pour se rapprocher d'un comportement élastique linéaire tout en évitant d'engendrer des déformations trop conséquentes.

Par ailleurs, les méthodes de propagation d'ondes, qui permettent de répondre à la problématique de ce travail, sont pour l'instant étudiées d'un point de vue numérique, et les données expérimentales manquent.

C'est pourquoi le chapitre 2 décrit la propagation des ondes sismiques dans un milieu élastique homogène, puis dans un matériau de type ballast ; le chapitre 3 présente ensuite les expérimentations réalisées en vraie grandeur pour palier le manque de données expérimentales.

Auscultation par méthodes sismiques

2.1 Introduction

Les caractéristiques mécaniques de la voie ferrée peuvent être déterminées à partir de méthodes géophysiques et en particulier par des méthodes sismiques. Dans ce travail, la recherche est orientée vers la compréhension de la propagation des ondes dans le ballast, qui est un milieu discret complexe jouant un rôle d’amortisseur de contraintes. Ce dernier présente une forte influence sur la réponse dynamique de la voie dans les hautes fréquences tandis que les couches sous-jacentes influencent la réponse à basse fréquence avec un fort contraste en vitesse d’onde en profondeur.

Les méthodes sismiques ([Lavergne, 1986](#); [Telford et al., 1990](#)) sont largement utilisées pour déterminer les caractéristiques mécaniques du sous-sol

- soit par des essais de surface avec les méthodes :
 - de réflexion ([Mari et al., 1998](#)),
 - de réfraction ([Magnin & Bertrand, 2005](#)),
 - et d’ondes de surface ([Woods, 1968](#); [Haupt, 1977](#); [Fabriol et al., 1998](#); [Mari et al., 1998](#); [Bodet et al., 2005](#); [Bodet, 2005](#); [Romdhane et al., 2007](#); [Ta et al., 2007](#); [Bentaleb, 2007](#); [Duloutre, 2009](#); [Meza Fajardo, Kristel et al., 2014](#));
- soit par des essais réalisés dans les forages avec les essais up-hole, down-hole et cross-hole ([Zinszner et al., 2002](#); [Innogeo, 2013](#)).

Les techniques sismiques les plus utilisées restent les techniques in situ en forage qui permettent d’obtenir un profil de vitesse des ondes (P et S) en fonction de la profondeur. De nombreuses études utilisent ces méthodes sismiques pour caractériser un site ([Ferber & Abraham, 2002](#); [Rey, 2005](#); [Gouedard, 2008](#); [Nebieridze, 2009](#); [Renalier, 2010](#); [Leparoux et al., 2010](#); [Duval et al., 2013](#)), pour ausculter des routes ([Baker, Mark R. et al., 1993](#); [Gucunski & Maher, 2002](#)), pour caractériser le béton ([Cavalié, 2005](#)), et pour détecter des cavités souterraines ([Leonard et al., 1998](#); [Grandjean et al., 2001](#); [Leparoux et al., 2002](#); [Evrard, 2002](#); [Suffert et al., 2006](#)). Une excitation sismique ponctuelle à la

surface d'un sol génère des ondes traversant le milieu appelées ondes de volume et des ondes d'amplitude significative près de la surface libre appelées onde de surface.

De nombreux traitements sont associés à ces méthodes ([Mari et al., 1997](#); [Larose, 2006](#); [Renalier, 2010](#)) :

- représentation temps/fréquence ([Roueff et al., 2001](#); [Roueff, 2003](#); [Meza Fajardo, Kristel et al., 2014](#)). La description des équations et du traitement d'inversion du champs d'onde temps fréquence est bien décrit dans le livre de [Semblat & Pecker \(2009\)](#) et les thèses de [Gelis \(2005\)](#); [Bodet \(2005\)](#).
- étude fréquentielle des signaux sismiques ([Rasolofosaon et al., 1983](#)),
- traitement en ondelettes des signaux sismiques ([Nguyen, 2000](#)).

Le principe de ces essais sismiques consiste à générer des ondes de volume par un ébranlement sismique en un point donné du site et à mesurer le temps de propagation de ces ondes à différents endroits. L'étude de la réfraction des ondes de compression (P) et de cisaillement (S) permet de déterminer les vitesses de compression du milieu $V_{(P,S)}$.

$$V_{(P,S)} = \frac{d}{\delta t_{(P,S)}} \quad (2.1)$$

avec :

- d : distance de propagation des ondes,
- $\delta t_{(P,S)}$: temps de propagation des ondes P et S.

Dans un espace semi infini, il existe d'autres types d'ondes guidées par la présence d'interfaces particulières comme l'onde de Stoneley (sol/sol) et l'onde de Scholte (sol/eau) ([Glangaud & al, 1999](#); [Adamy & Mouton, 2002](#)) utilisée en prospection sous-marine.

L'étude du comportement des sols est une phase importante afin de préciser leurs propriétés de déformation sous des sollicitations dynamiques. Dans un contexte de comportement élastique linéaire, les équations de propagation sont généralement obtenues en faisant l'hypothèse d'un milieu monophasique ou un milieu poreux biphasique.

2.2 Ondes de volume - milieu élastique infini homogène isotrope

2.2.1 Généralités

Il existe deux types d'ondes de volume répondant à la théorie de la mécanique du solide ([Poisson, 1811](#)) :

2.2 Ondes de volume - milieu élastique infini homogène isotrope

1. **Les ondes primaires P** (appelées également ondes de compression ou ondes longitudinales) pour lesquelles le déplacement du sol se fait par dilatation et compression successives, parallèlement à la direction de propagation de l'onde (figure 2.1). Ce sont les ondes les plus rapides.

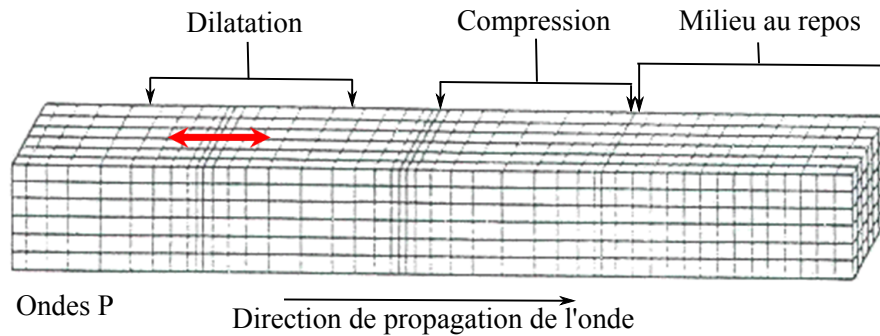


Figure 2.1 – Propagation d'ondes de compression (ondes P)

Elles sont généralement utilisées en géophysique avec les méthodes de réflexion en générant un choc au moyen d'une masse.

2. **Les ondes secondaires S** (appelées également onde de cisaillement ou ondes transversales) polarisées perpendiculairement à la direction de propagation (figure 2.2). Ces ondes ne se propagent pas dans les fluides. Leur vitesse est plus faible que celle des ondes P.

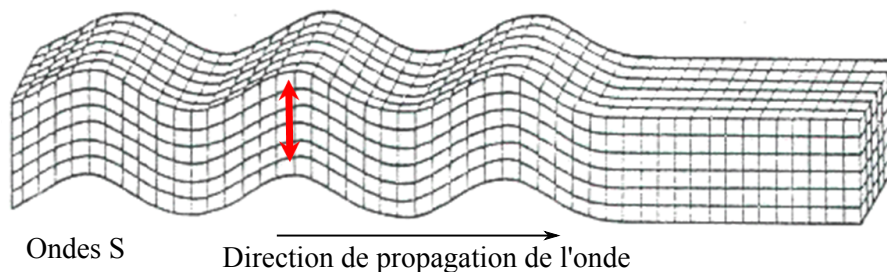


Figure 2.2 – Propagation d'ondes de cisaillement (ondes S)

Ces ondes sont plus difficiles à générer car il convient de cisailier le sol. L'essai down hole permet de générer ce type d'onde.

Les ondes de volume peuvent être réfléchies ou réfractées, c'est-à-dire déviées à chaque changement de milieu (lois de Descartes, principe de Huygens, une onde P ou S peut générer des ondes P et S). Elles peuvent ainsi suivre des trajets très complexes à l'intérieur du sol (figure 2.3).

Dans un milieu supposé homogène, isotrope et élastique linéaire, les relations entre contraintes et déformations dépendent seulement des deux paramètres de Lamé (λ et μ).

La loi de Hooke s'écrit alors :

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta_V \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (2.2)$$

avec :

- σ_{ij} : composantes du tenseur des contraintes de Cauchy ;
- ε_{ij} : tenseur des déformations linéarisé,
- δ_{ij} : symbole de Kronecker qui est égal à 1 si $i = j$ et à 0 si $i \neq j$,
- θ_V : dilatation volumique ($\theta_V = \text{tr} \varepsilon$),
- λ et μ : constantes de Lamé.

Ces constantes sont fonction du module d'Young E et du coefficient de Poisson ν .

- λ : premier paramètre de Lamé

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2.3)$$

- μ : deuxième paramètre de Lamé aussi appelé module de cisaillement G

$$\mu = G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.4)$$

L'équation des ondes s'obtient en écrivant le principe fondamental de la dynamique.

Par exemple, dans la direction Ox :

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

avec u_x , déplacement du point M au passage de l'onde

En appliquant la loi de Hooke pour remplacer les contraintes par les déformations (équation 2.2), l'équation des ondes peut s'écrire sous une forme générale :

$$(\lambda + \mu) \underline{\text{grad}}(\text{div} \underline{u}) + \mu \Delta \underline{u} = \rho \frac{\partial^2 \underline{u}}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

avec :

- $\Delta \underline{u}$: Laplacien de \underline{u} : $\Delta \underline{u} = \frac{\partial^2 \underline{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \underline{u}}{\partial z^2}$,
- \underline{u} : déplacement du point M au passage de l'onde,
- $\text{div} \underline{u}$: divergence de \underline{u} égale à $\left\{ \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right\}$,
- $\underline{\text{grad}}(\text{div} \underline{u})$: vecteur égal à $\left\{ \frac{\partial \text{div} \underline{u}}{\partial x}, \frac{\partial \text{div} \underline{u}}{\partial y}, \frac{\partial \text{div} \underline{u}}{\partial z} \right\}$.

2.2 Ondes de volume - milieu élastique infini homogène isotrope

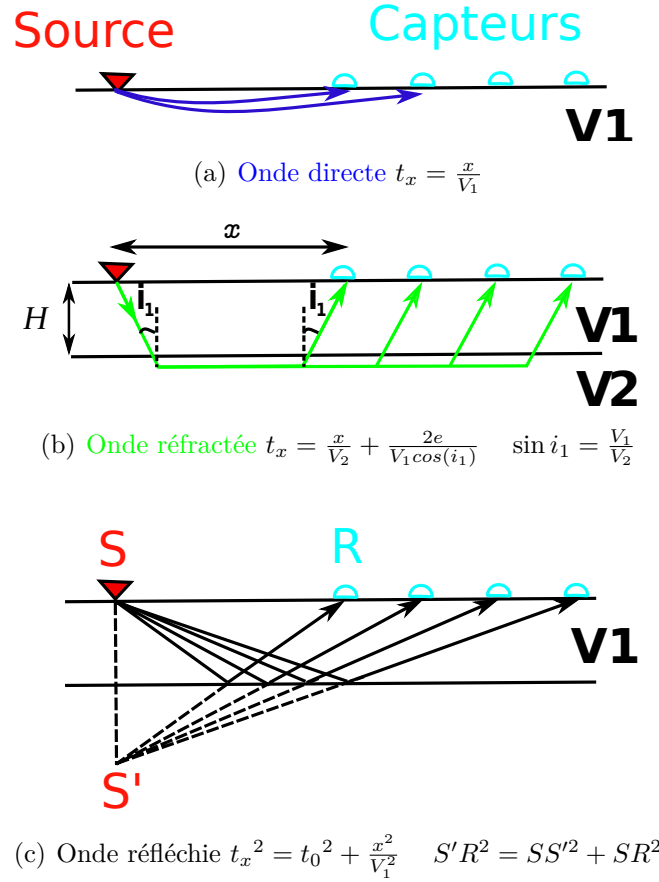


Figure 2.3 – Propagation des ondes sismiques dans le sol - [Mari et al. \(1997\)](#)

On peut alors décomposer le vecteur déplacement \underline{u} en introduisant un potentiel scalaire Φ (composante de dilatation) et un potentiel vectoriel Ψ (composante de distorsion) suivant la décomposition de [Helmholtz \(1858\)](#), afin de faire apparaître les ondes P et S.

$$\underline{u} = \underline{grad}\Phi + \underline{rot}\Psi \quad (2.7)$$

avec

Φ : potentiel de dilatation,

Ψ : potentiel de distorsion.

L'équation d'ondes est satisfaite avec les potentiels Φ et Ψ suivant les équations 2.9 donnant deux solutions d'ondes (onde de compression et de cisaillement).

Les vitesses V_P et V_S de ces ondes sont fonction de la densité ρ du milieu et des coefficients de Lamé (équations 2.9 et 2.3) :

$$\left\{ \begin{array}{ll} V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} & \text{onde de compression} \\ V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{2(1 + \nu)}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} & \text{onde de cisaillement} \end{array} \right. \quad (2.8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\Phi = \frac{1}{V_p^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \\ \Delta\Psi_i = \frac{1}{V_s^2} \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial t^2} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Les valeurs du module de cisaillement G et du module d'Young E sont décrites dans les relations 2.10 et 2.11 :

- le module de cisaillement est le rapport de la contrainte tangentielle au cisaillement :

$$G = \rho V_S^2 = \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{xy}}{\varepsilon_{xy}} \quad (2.10)$$

La mesure de la vitesse des ondes de volume (cisaillement et compression) permet ainsi de remonter au module de cisaillement G en utilisant la formule 2.10 et de déterminer la valeur du coefficient de Poisson par la relation 2.12. Ces modules en très petites déformations (de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-4}) déterminés par les géophysiciens ne peuvent généralement pas être comparés aux modules en grandes déformations des géotechniciens ;

- le module d'Young est le rapport de la contrainte normale à la compression correspondante :

$$E = \frac{\rho V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2)}{V_P^2 - V_S^2} = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} = 2\mu(1 + \nu) = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}} \quad (2.11)$$

Par exemple, le module de l'acier est égal à $E = 210 \cdot 10^9$ Pa (210 GPa).

Le coefficient de Poisson (rapport de la compression dans une direction à l'extension dans la direction perpendiculaire compris entre -1 et +0,5) peut être identifié à partir des paramètres de Lamé ou des vitesses V_P et V_S :

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx}} = \frac{\lambda}{2\lambda + \mu} = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} \quad (2.12)$$

2.2.2 Réfraction des ondes

Les ondes sismiques suivent des lois similaires à celles des rayons lumineux et en particulier les lois de réflexion et de réfraction (lois de Descartes, figure 2.4).

2.2 Ondes de volume - milieu élastique infini homogène isotrope

Le front d'onde se réfracte sur les différents horizons rencontrés. Dans le cas critique, le front d'onde se propage horizontalement dans la couche sous-jacente pour un angle d'incidence i_1 critique dénommé angle de réfraction limite lorsque i_2 est égal à $\frac{\pi}{2}$ tel que :

$$\sin i_1 = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.13)$$

Les ondes de compression sont facilement détectables car elles présentent la particularité d'être les plus rapides. Les vitesses de propagation des différents milieux sont ainsi déterminées en détectant l'arrivée des ondes. Ce traitement suppose que l'on considère nécessairement des lois de milieux continus (figure 2.4, Magnin & Bertrand (2005)).

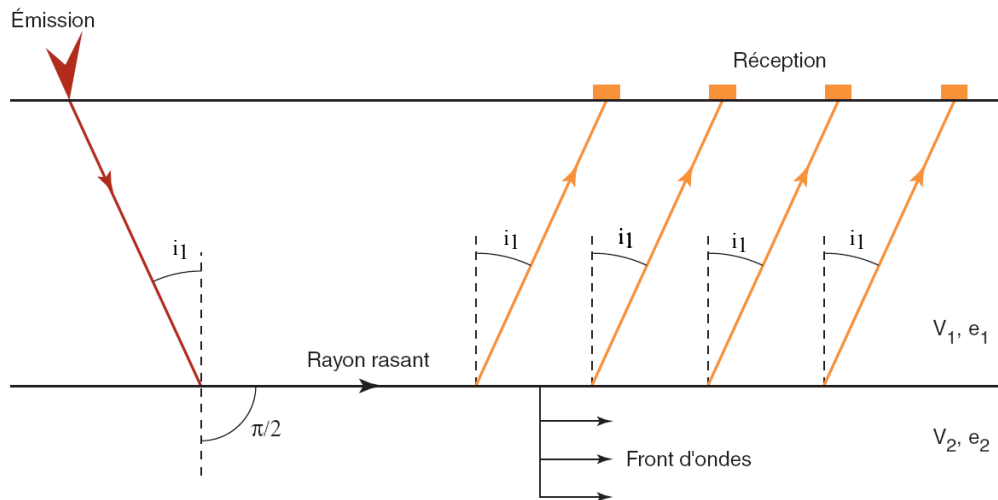


Figure 2.4 – Réfraction totale des ondes (Magnin & Bertrand, 2005) - Schéma de principe,

La vitesse des ondes est calculée pour les sources ponctuelles en détectant automatiquement l'arrivée des ondes et en traçant l'hodochrone, graphe mettant en relation les temps d'arrivée des ondes en fonction de la distance. La célérité est obtenue après régression linéaire des sélections de points de même pente.

La détection de l'arrivée des ondes émises à partir de sources continues type vibrateurs est plus complexe et ne peut pas être déterminée de la façon décrite ci-dessus. L'annexe B.5 est consacrée à ce traitement.

2.3 Ondes de Rayleigh - milieu élastique semi-infini, homogène et hétérogène, isotrope

2.3.1 Généralités sur les ondes de surface

L'énergie d'un ébranlement sismique se propage dans le sous-sol avec des ondes de volume et des ondes de surface. La propagation des ondes dans un milieu semi-infini donne naissance à un troisième type d'ondes guidées par la surface. Lorsque la discontinuité est une surface libre, on parle d'ondes de surface. Elles sont de deux types : les ondes de Rayleigh et les ondes de Love. Elles sont concentrées dans une épaisseur de l'ordre d'une longueur d'onde. Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais avec une amplitude plus forte. Ainsi, les ondes de surface permettent d'obtenir un bon rapport signal sur bruit sans employer obligatoirement une source énergétique.

La vitesse des ondes de surface dépend essentiellement du profil de vitesse des ondes de cisaillement (épaisseurs et valeurs de vitesse V_S des différentes couches (Xia et al., 1999; Fernandez et al., 2011)).

Les ondes de Rayleigh (figure 2.6), mises en évidence par Rayleigh (1885) se propagent le long d'une surface libre avec une forte amplitude en surface qui décroît rapidement en profondeur. Les ondes de surface sont des solutions de l'équation d'onde (équation 2.6 à la page 36) vérifiant deux conditions qui décrivent le piégeage de l'énergie proche de la surface :

- condition de surface libre (annulation des contraintes à la surface libre),
- décroissance de l'amplitude à grande profondeur (amplitude nulle à une profondeur infinie).

Les ondes de love ont été découvertes par Augustus Edward Hough Love en 1911. Leur déplacement est comparable à celui des ondes de cisaillement S sans le mouvement vertical. On les enregistre uniquement sur les composantes horizontales du sismomètre.

Dans la suite, nous parlerons uniquement des ondes de Rayleigh V_R qui ont fait l'objet de ce travail. Localement cette onde peut être caractérisée par sa période et sa vitesse apparente qui varie le long de l'hodochrone (figure 2.5).

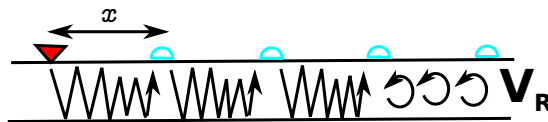


Figure 2.5 – Propagation des ondes de surface, Mari et al. (1997) $t_x = \frac{x}{V_R}$ avec $V_R = \frac{\delta x}{\delta t}$

2.3 Ondes de Rayleigh - milieu élastique semi-infini, homogène et hétérogène, isotrope

2.3.2 Polarisation

Les ondes de Rayleigh résultent de l'interférence entre les ondes P et les ondes SV (onde S avec mouvement vertical) réfléchies sur la surface libre et aux interfaces. Elles sont polarisées dans le plan vertical incluant la direction de propagation. Les vitesses de ces ondes dépendent principalement du profil de vitesse des ondes S et du profil de densité (section 2.3.4).

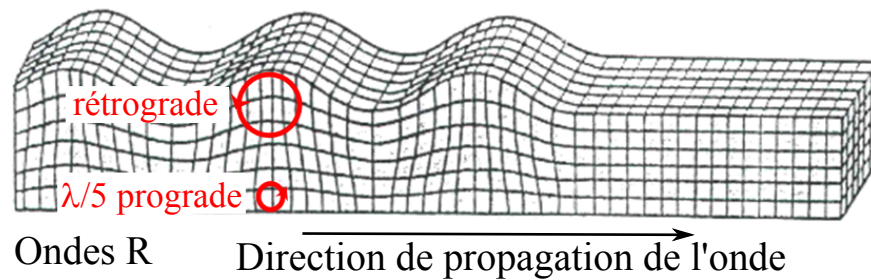


Figure 2.6 – Schéma représentant la propagation des ondes de Rayleigh

Au passage d'une onde de Rayleigh, les particules en surface décrivent un mouvement elliptique rétrograde par rapport à la direction de propagation. À partir d'une profondeur équivalente à $\lambda/5$, le mouvement des particules en profondeur évolue pour composer un mouvement elliptique prograde.

2.3.3 Énergie des ondes de Rayleigh

Dans un demi-espace homogène et isotrope, 67 % de l'énergie d'une source vibrant verticalement se propage en une onde de surface dite de Rayleigh (R), 26 % en une onde de cisaillement (S) et 7 % en une onde de compression (P), (tableau 2.1).

Cet aspect énergétique montre que les ondes de surface sont relativement faciles à générer et à mesurer. L'amplitude des ondes de surface décroît exponentiellement avec la profondeur. Elles sont donc adaptées à l'étude des couches superficielles.

D'autre part, la profondeur de pénétration des ondes de surface ne dépasse pas quelques longueurs d'onde λ (figure 2.7).

Tableau 2.1 – Répartition de l'énergie d'une source vibrante, [Miller & Pursey \(1955\)](#)

Type d'onde	Pourcentage d'énergie
Rayleigh	67
Cisaillement	26
Compression	7

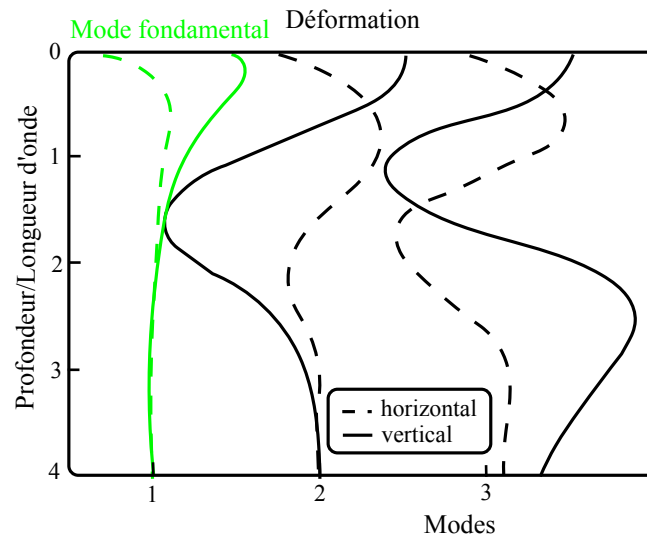


Figure 2.7 – Profil de déformation et de pénétration des ondes de Rayleigh en fonction de la longueur d'onde, [Foti \(2000\)](#)

2.3.4 Équation des ondes de Rayleigh

Les ondes de Rayleigh dérivent de la somme d'un potentiel scalaire ϕ et d'un potentiel vectoriel ψ selon l'équation 2.7 à la page 37 de la décomposition de [Helmholtz \(1858\)](#), de la forme :

$$\begin{aligned}\phi &= Ae^{-rkz} e^{ik(x-V_R t)} \\ \psi &= Be^{-skz} e^{ik(x-V_R t)}\end{aligned}\tag{2.14}$$

avec

- k : le nombre d'onde (m^{-1}) proportionnel à l'inverse de la longueur d'onde $k = \frac{2\pi}{\lambda}$,
- x, z : la direction de propagation dans l'axe x et z d'un repère $Oxyz$

2.3 Ondes de Rayleigh - milieu élastique semi-infini, homogène et hétérogène, isotrope

où O se trouve sur le plan formant la surface libre de propagation avec l'axe z orienté perpendiculairement à cette dernière,

- r et s : deux constantes positives,
- t : le temps,
- V_R : la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh.

En appliquant la décomposition d'Helmholtz à l'équation de propagation et en supposant un demi-espace homogène de vitesses V_P et V_S , nous obtenons l'équation de Rayleigh suivante :

$$\left(4\left(1 - \frac{V_R^2}{V_P^2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(1 - \frac{V_R^2}{V_S^2}\right)^{\frac{1}{2}}\right) = \left(2 - \frac{V_R^2}{V_S^2}\right)^2 \quad (2.15)$$

Cette équation admet une seule racine positive ([Nkemzi, 1997](#)) :

$$V_R = \left\{4\left(1 - \gamma^{\frac{1}{2}}\right) - \frac{1}{\pi} \int_1^{\frac{1}{\gamma}} \tan^{-1} \left(\frac{4(1 - \gamma t)^{\frac{1}{2}}(t - 1)^{\frac{1}{2}}}{(2 - t)^2} \right) dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

avec $\gamma = \left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2$ et V_R la vitesse des ondes de Rayleigh.

L'approximation de cette racine donnée par [Viktorov \(1965\)](#) est :

$$V_R = \frac{2,86\lambda + 1,74\mu}{3\lambda + 2\mu} \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \frac{1,12\nu + 0,87}{1 + \nu} V_S \quad (2.17)$$

Dans un modèle stratifié, la vitesse de phase des ondes de Rayleigh dépend de la vitesse des ondes S et des ondes P, de la densité et de la hauteur de chacune des couches ; la vitesse des ondes S, V_S , étant le paramètre le plus sensible.

L'équation 2.17 montre bien que la vitesse de Rayleigh dépend de la densité des matériaux en place. C'est ce facteur influent que nous souhaitons étudier en définissant si la variation est quantifiable d'un point de vue sismique en mesurant une variation de vitesse suffisamment importante.

Lorsque ν varie de 0,2 à 0,4, le terme $\frac{1,12\nu+0,87}{1+\nu}$ varie de 0,9 à 0,94. La vitesse de Rayleigh V_R est donc très proche de la vitesse de cisaillement V_S et par la même est liée au module de cisaillement G (équation 2.10).

2.3.5 Dispersion des ondes - milieu semi infini, élastique hétérogène

[Lamb \(1904\)](#) a mis en évidence la nature dispersive des ondes de Rayleigh, c'est-à-dire la variation de la vitesse de ces ondes en fonction de la fréquence lorsque le milieu est stratifié.

Dans le cas d'un milieu semi-infini homogène, il n'y a pas de dispersion des ondes, comme le montre la figure 2.8.

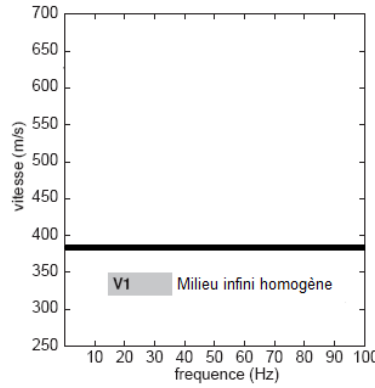


Figure 2.8 – Profil de vitesse dans le cas d'un milieu élastique semi infini homogène, graphe inspiré de [Bodet \(2005\)](#)

Dans un milieu où la vitesse V_s varie avec la profondeur, les ondes de surface sont dispersives : leur vitesse dépend de leur profondeur de pénétration, donc de leur fréquence.

Ainsi, si un milieu est stratifié, la vitesse de Rayleigh V_R des ondes de surface est fonction de la fréquence f . C'est ce phénomène, appelé dispersion, qui est mis à profit dans les méthodes de reconnaissance et qui est bien visible sur les profils de vitesse des travaux de [Bodet \(2005\)](#) (figure 2.9).

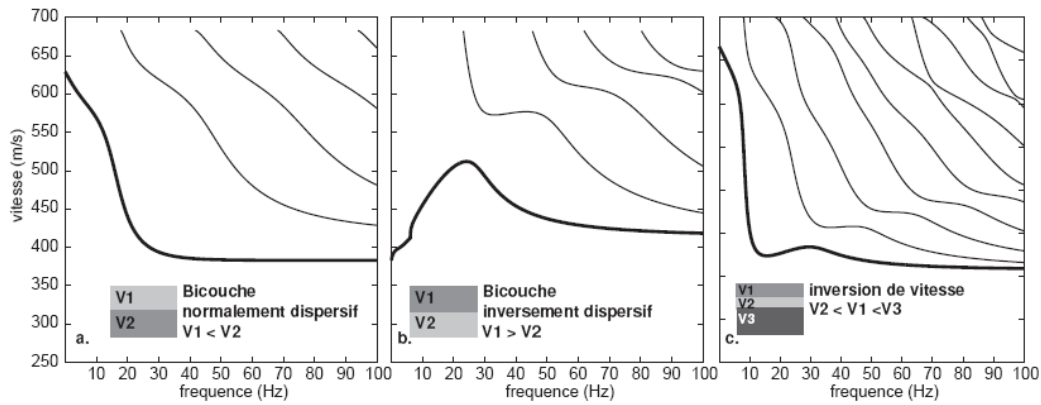


Figure 2.9 – Profils de vitesse dans le cas d'un milieu élastique semi infini hétérogène, [Bodet \(2005\)](#)

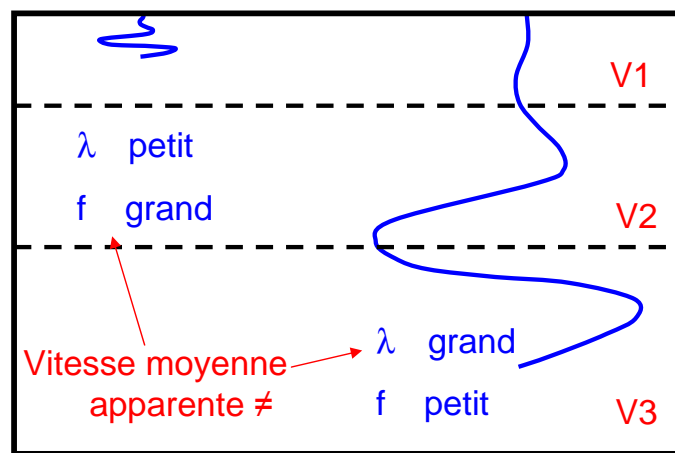
La longueur de l'onde de Rayleigh λ_R est fonction de la vitesse de propagation dans le milieu et de la fréquence de la sollicitation générant l'onde (équation 2.18) :

$$\lambda_R = \frac{V_R}{f} \quad (2.18)$$

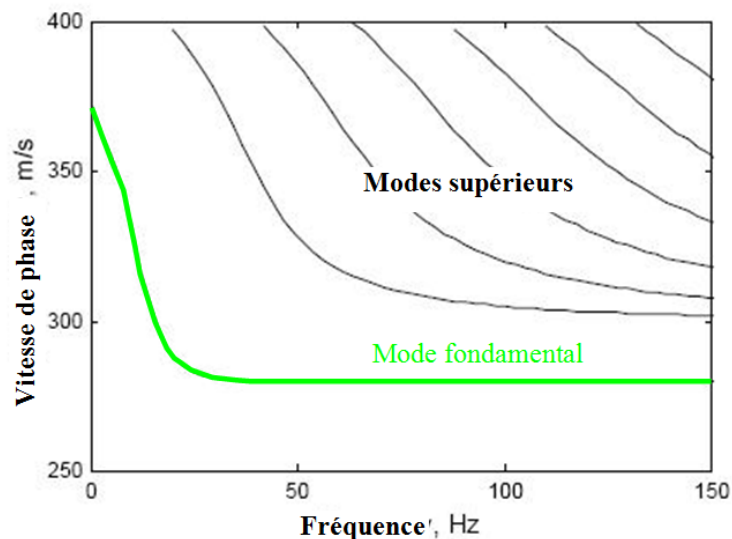
2.3 Ondes de Rayleigh - milieu élastique semi-infini, homogène et hétérogène, isotrope

2.3.6 Vitesse de groupe - Vitesse de phase

En se plaçant dans un semi-espace infini, élastique et verticalement hétérogène et en recherchant une solution de la forme $e^{-kz}e^{ik(x-V_Rt)}$, on s'aperçoit qu'il existe plusieurs solutions avec une relation de dispersion où la vitesse de Rayleigh dépend de la fréquence. Pour une fréquence donnée, il existe un nombre fini de nombres d'onde possibles correspondant aux différents modes de propagation de l'onde qui ont des vitesses différentes (figure 2.10).



(a) Schéma explicatif de la profondeur d'auscultation



(b) Relation vitesse de phase / fréquence

Figure 2.10 – Courbes de dispersion des différents modes de Rayleigh

2 Auscultation par méthodes sismiques

De ce fait, on distingue la vitesse de groupe de l'ensemble des modes et la vitesse de phase pour chaque mode ; le mode fondamental correspondant à la vitesse de phase la plus faible.

L'image à retenir pour comprendre la différence entre la vitesse de groupe et la vitesse de phase est la suivante. Prenons un groupe de marcheurs : l'ensemble du groupe se déplace à une vitesse donnée. Néanmoins, au sein du groupe, les enfants marcheront plus vite que les adultes. Dans ce cas, on pourrait parler de vitesse de phase. C'est ce que nous visualisons sur le graphique de la figure 2.11. En effet le temps entre deux pics de même phase est plus faible que celui entre deux pics d'un même groupe (figure 2.11).

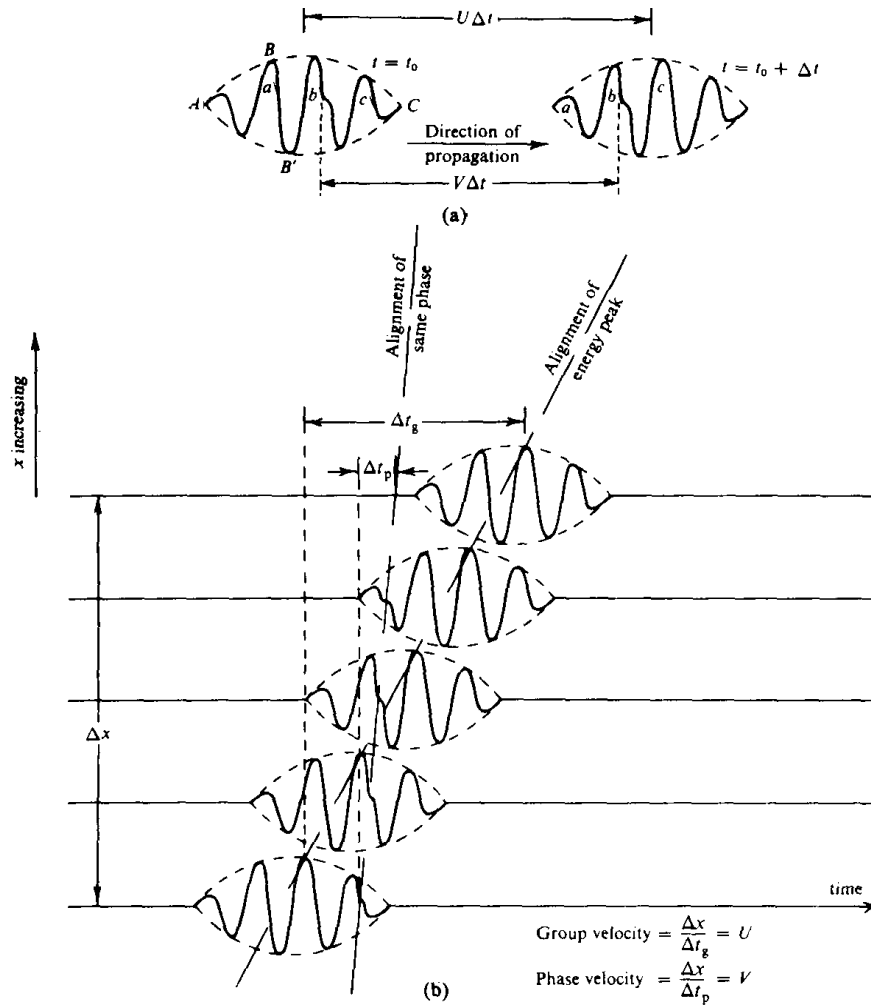


Figure 2.11 – (a) Vitesse de groupe U et de phase (b) Arrivée des ondes dispersives pour différents géophones, [Sheriff & Geldart \(1995\)](#)

Lorsque l'on génère un signal avec des hautes fréquences, comme on souhaite le faire pour l'auscultation dans le ballast, on génère des modes supérieurs (figure 2.10) qui rendent plus difficile l'interprétation en créant du bruit.

2.3 Ondes de Rayleigh - milieu élastique semi-infini, homogène et hétérogène, isotrope

Néanmoins, ces modes trouvent leur utilité dans les hautes fréquences où le dispositif est de faible dimension. Dans ce cas, l'onde de Rayleigh n'a pas le temps de se développer et les modes supérieurs peuvent présenter une énergie plus conséquente que le mode fondamental. Ainsi, après recalage, il est possible de déterminer le mode fondamental à partir des modes supérieurs.

Sur un chronogramme, il est ainsi possible de voir le train d'ondes pour chaque géophone. La vitesse de groupe caractérise le déplacement de l'ensemble du train d'ondes en moyennant toutes les vitesses. On parle ainsi de "paquets d'ondes". La vitesse de phase est utilisée dans la méthode des ondes de surface. Elle correspond au rapport entre la pulsation ω et le nombre d'onde k . Le nombre d'onde correspond aux nombres d'oscillations de l'onde sur une unité de longueur. Il est inversement proportionnel à la longueur d'onde de Rayleigh ($k = \frac{1}{\lambda_R}$).

La vitesse de phase de l'onde de Rayleigh est calculée à partir de la relation 2.18 et de la relation reliant le déphasage au temps de propagation $\frac{\theta}{2\pi} = \frac{t}{T}$. Ainsi, la vitesse de phase est reliée à f par l'expression 2.19 (Mari et al., 1998) :

$$V_R(f) = \frac{2\pi f d}{\theta} \quad (2.19)$$

avec :

- d : distance de mesure en mètre (généralement entre deux récepteurs),
- θ : la différence de phase en radian relative à la distance d ,
- f : la fréquence d'émission,
- V_R : la vitesse des ondes de Rayleigh à la fréquence f en m/s .

La vitesse de phase des ondes de Rayleigh varie suivant quatre paramètres principaux (Xia et al., 2000; Abem, 2011) :

- la vitesse de cisaillement (40%),
- la profondeur des couches (20%),
- la densité du milieu (10%),
- la vitesse de compression (3%).

2.3.7 Protocole de mesure

Les longueurs d'onde enregistrables dépendent de l'espacement entre les capteurs et de la longueur du dispositif mais aussi de la fréquence de coupure des capteurs. La fiabilité de la courbe de dispersion est fonction de la résolution (rapport λ/L) et des effets du champ proche. Il convient que la longueur d'onde soit très petite devant la longueur du dispositif (rapport λ/L petit - Bodet et al. (2005)) afin que l'identification de la courbe de dispersion soit précise. Le dispositif doit se trouver en dehors de la zone de champ proche. En effet,

les ondes de surface ne peuvent pas y être aisément identifiées du fait de la trop forte amplitude des ondes de volume et de la proximité de la source. Cette dernière induit une propagation cylindrique dans le champ proche ne permettant pas de considérer une onde plane. Pour éviter les effets de champ proche, [Stokoe et al. \(1994\)](#) recommandent de ne pas considérer les longueurs d'onde supérieures à 2 fois la distance x_1 entre la source et le premier récepteur pour des tirs éloignés du dispositif. [O'neills \(2004\)](#) a trouvé que la longueur d'onde maximale fiable dépend de la longueur du profil $\lambda_{max} = 0,4L$.

Dans les années 1980, la méthode dite SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) a été développée. Elle était utilisée pour la reconnaissance des chaussées ([Heisey & Meyer, 1982](#); [Nazarian & Stokoe, 1984](#)) et permettait de déterminer un profil sismique au moyen d'un vibreur et de deux géophones que l'on déplaçait. La procédure de mesures SASW décrite par [Foti \(2000\)](#) consiste à solliciter à 1,2 m du rail en disposant les géophones parallèlement et perpendiculairement à la voie. La distance entre les géophones est doublée à chaque nouvelle mesure. Cette méthode permet de caractériser les différentes couches de terrain (épaisseur, caractéristiques mécaniques, etc.).

Deux dispositifs peuvent être réalisés afin de balayer latéralement la surface du terrain et ainsi faire varier différentes valeurs de L (Longueur de dispositif) et d (écartement entre géophones) : soit en conservant la même position de la source et en écartant les géophones, soit en gardant le point milieu des deux récepteurs, commun à toutes les mesures et en déplaçant la source.

Avec la méthode SASW, on fait l'hypothèse que le mode fondamental de Rayleigh est la seule onde enregistrée (figure 2.10). De ce fait, on néglige l'influence des modes supérieurs. Afin de les prendre en compte et avoir une meilleure résolution, [Park et al. \(1997\)](#) proposèrent la « Multi-channel Analysis of Surface Waves » (MASW). Cette méthode est une adaptation de la SASW à des enregistrements avec de nombreux géophones alignés : le dispositif d'acquisition est similaire à celui de la sismique réfraction en ondes P (ondes de Rayleigh) ou en ondes SH (ondes de Love).

L'étude de [Anbazhagan et al. \(2010, 2011\)](#) permet de mesurer les modules de cisaillement en petite déformation en utilisant un sondage MASW. Un modèle de voies comprenant 9 modalités de pollution (teneur en fines du ballast) a été réalisé. Le dispositif comprend 12 géophones de 10 Hz de fréquence propre et un marteau de 1 kg. Différentes distances entre la source et le premier récepteur ainsi que différents espacements entre géophones ont été testés. La meilleure configuration retenue est un espacement entre géophones de 25 cm et un offset de 50 cm. La vitesse de la courbe de dispersion est de 150 m/s avec des fréquences de 35 à 60 Hz.

L'étude d'[Anbazhagan et al. \(2011\)](#) comporte un modèle de voie ferrée avec différents types de matériaux encrassant le ballast à des concentrations variables. Les résultats des ondes de surface de cette étude montrent que

2.3 Ondes de Rayleigh - milieu élastique semi-infini, homogène et hétérogène, isotrope

la vitesse des ondes de cisaillement augmente avant le point d'engrassement optimal, équivalent à 39 % pour un engrassement au pétrole et de 36 % avec l'argile, et diminue après.

Les progrès technologiques combinés à des modèles analytiques performants conduisent à l'utilisation de sources impulsionnelles et entretenues et des enregistrements avec un nombre conséquent de géophones. Toutes les méthodes en ondes de surface sont basées sur l'inversion des courbes de dispersion en faisant l'hypothèse d'ondes planes se propageant dans un milieu tabulaire. Cette inversion consiste à :

1. déterminer la courbe de dispersion à partir des enregistrements sismiques,
2. inverser cette courbe de dispersion pour retrouver le profil unidirectionnel de vitesse.

2.3.8 Traitement

2.3.8.1 Première étape - courbe de dispersion

Le principe est d'enregistrer le signal reçu par une série de récepteurs.

Une fois l'ensemble des mesures faites, on va, dans une première étape, créer la courbe de dispersion du signal (fréquence en fonction de la vitesse de phase).

Afin de bien comprendre l'interprétation d'un chronogramme lors d'un enregistrement au moyen d'une flûte sismique et la courbe de dispersion qui en découle, la figure 2.12 détaille le type d'onde ainsi que le dispositif sismique utilisé.

La dispersion des ondes peut être visible sur les chronogrammes dans le domaine temps-distance (noté $t - x$).

Différentes techniques de traitement du signal peuvent être appliquées pour transformer le signal de l'espace temps-distance à l'espace de la courbe de dispersion : l'espace fréquence-vitesse. La technique la plus simple consiste à représenter le signal dans l'espace fréquence-nombre d'ondes (noté $f - k$) par transformée de Fourier 2D (Lacoss et al., 1969). On passe alors de l'espace fréquence-nombre d'ondes à l'espace fréquence-vitesse par la relation :

$$s(f) = \frac{|k|}{2\pi f} \quad V_R = \frac{\omega}{|k|} \quad (2.20)$$

avec

- s : lenteur (inverse de la vitesse) en s/m,
- k : nombre d'ondes (en rad/m) correspondant à $\frac{\theta}{d}$,
- f : fréquence en Hz.

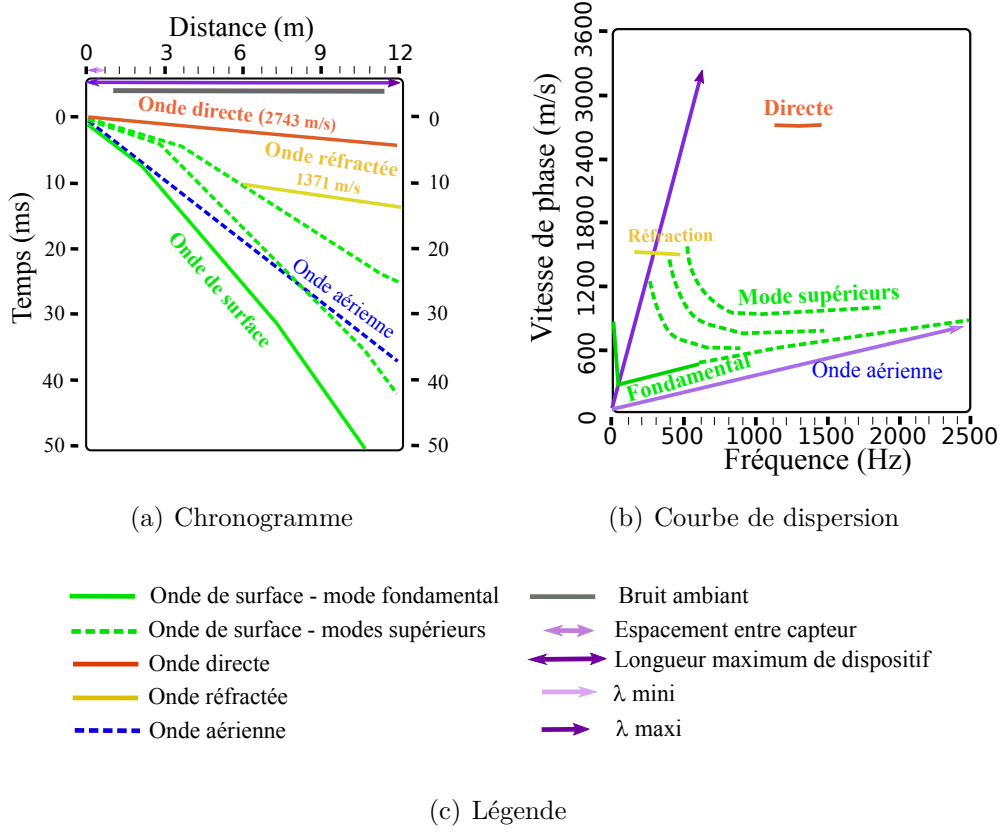


Figure 2.12 – Interprétation de graphes issues de mesures sismique en onde de surface (Park et al., 2001)

À partir des techniques de traitement du signal, le signal est représenté dans le domaine fréquence-vitesse ($f-c$) et dans le domaine pulsation spatiale-pulsation temporelle ($k-\omega$). Ces techniques supposent que le train d'ondes observé peut être décomposé en une somme d'ondes planes avec des distances source-récepteur de plusieurs longueurs d'ondes correspondant au champ lointain. Ainsi pour un milieu constitué de couches horizontales et homogènes, le signal sismique peut être décrit comme la superposition d'une infinité de modes m des ondes de surface, associés aux nombres d'onde $k_m(\omega)$, fonction de la fréquence angulaire ω :

$$s(x, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \sum_m A_m(x, \omega) e^{i(\omega t - k_m(\omega)x)} d\omega \quad (2.21)$$

où $A_m(x, \omega)$ est l'amplitude spectrale du signal sismique, x la distance, t le temps. Les vitesses de phase c_m ou lenteurs p_m correspondant à chaque mode m de propagation des ondes de surface sont définies par :

2.3 Ondes de Rayleigh - milieu élastique semi-infini, homogène et hétérogène, isotrope

$$c_m(\omega) = \frac{1}{p_m(\omega)} = \frac{\omega}{k_m(\omega)} \quad (2.22)$$

Ces vitesses sont déterminées grâce aux techniques de transformation $f - k$ (fréquence-nombre d'onde, [Mari et al. \(1997\)](#); [Roueff \(2003\)](#); [Meza Fajardo, Kristel et al. \(2014\)](#)) et de transformation $\tau - p$ (intercept pente).

Nous évoquerons uniquement le traitement $f - k$ qui concerne notre étude.

Traitement $f - k$

La transformée $f - k$ ([Bodet, 2005](#)) consiste à transposer un sismogramme $s(x, t)$ du domaine $(x - t)$ vers le domaine $(k - \omega)$, à partir d'une transformée de Fourier à deux dimensions, selon t dans un premier temps et selon x dans un second temps (équation 2.23). Cette méthode sera appliquée sur nos traitements au moyen du logiciel Geopsy ([Wathelet et al., 2007](#)).

$$s(k, \omega) = \int \int s(x, t) e^{(ikx - i\omega t)} \partial x \partial t \quad (2.23)$$

Cette méthode nécessite au préalable de corriger le sismographe de l'atténuation géométrique.

[Mari et al. \(1998\)](#) illustre bien ce traitement à la page 99.

2.3.8.2 Deuxième étape - inversion

La deuxième étape dans la modélisation consiste à générer un modèle de sol (différentes épaisseurs de sol avec des vitesses sismiques déterminées) et à comparer la courbe de dispersion de cette modélisation avec la courbe de dispersion trouvée par les essais. S'il y a une différence, on change le modèle et on recommence. Cette procédure s'appelle identification inverse. La détermination d'un modèle de sol à partir de la courbe de dispersion est principalement dépendante de la vitesse de cisaillement et de l'épaisseur. Le paramètre de densité influe également mais pondère moins le résultat du modèle du fait de son implication d'environ 10 %. C'est cette variation que nous souhaiterions quantifier par nos travaux. Ces deux paramètres variant en même temps, il est nécessaire de fixer l'épaisseur par le biais de modèles afin d'obtenir la vitesse de cisaillement.

Le résultat final est souvent présenté sous la forme du graphique de la vitesse sismique en fonction de la profondeur pour une position donnée.

La transformation du diagramme de dispersion en diagramme donnant le module de cisaillement G_0 en fonction de la profondeur se fait à l'aide de l'équation 2.24 et d'un procédé d'inversion (figure 2.13).

$$G_0 = \mu = \rho V_S^2 = \rho \left(\frac{V_R^2}{C^2} \right) \quad (2.24)$$

avec :

- ρ : masse volumique,
- V_R : vitesse de phase,
- C : constante égale à 0,9 en général.

L'inversion la plus simple est empirique. Elle consiste à admettre un rapport constant k_i entre la longueur d'onde et la profondeur (équation 2.24).

$$k_i = \frac{\lambda}{z} \quad (2.25)$$

Rappelons que $\lambda = \frac{V_R(f)}{f}$. Les valeurs généralement admises sont de $k_i=2$ quand la rigidité est plutôt constante avec la profondeur ; $k_i=4$ quand la rigidité croît fortement avec la profondeur. À partir de ce stade, les résultats peuvent être affinés par inversion par une méthode aux différences finies (Clayton et al., 2006), en ajustant par itération un modèle calculé aux données réelles.

2.3.8.3 Troisième étape - interpolation

La dernière étape du traitement des ondes de Rayleigh consiste à interpoler les vitesses de cisaillement V_S obtenues pour plusieurs colonnes de sol 1D en profil 2D (figure 2.13).

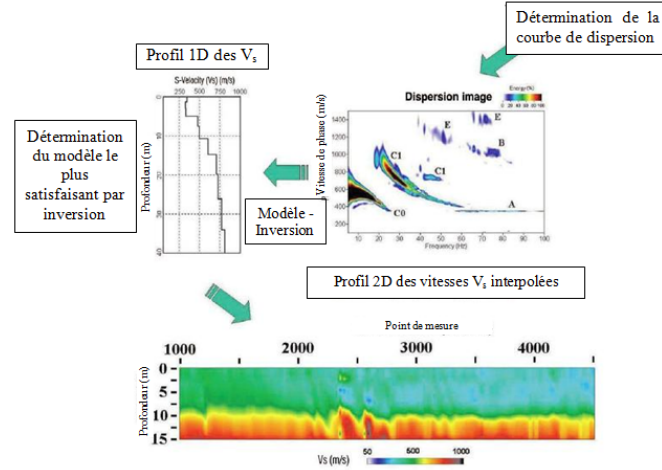


Figure 2.13 – Interpolation des vitesses de cisaillement sur un modèle 2D (Park et al., 2007)

2.3.9 Développement futur de cette méthode

Ces mesures sont non destructives et présentent un avenir certain en automatisant sur site l'installation des géophones et en déplaçant l'ensemble. Le prototype d'automatisation de la mesure d'ondes de surface a été développé et testé par KGS (Kansas Geological Survey - figure 2.14).

2.4 Amortissement des ondes

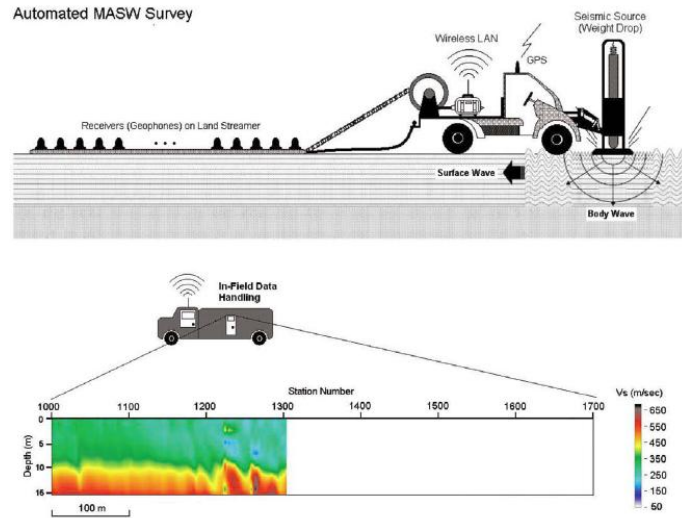


Figure 2.14 – Mesures automatisées d’onde de surface au moyen d’un prototype KGS (Park et al., 2007)

La résolution latérale des ondes de surface est faible car on est perpendiculaire à la ligne de capteurs. Si l’on rencontre des variations latérales, les courbes de dispersion du mode fondamental sont élargies. Elles reflètent le modèle moyen des vitesses sous le dispositif d’acquisition. De ce fait, on parle moins de dispositif et plus d’antennes.

2.4 Amortissement des ondes

Dans le cas d’une source ponctuelle, les ondes de volume se propagent avec un front sphérique centré sur la source tandis que les ondes de surface se propagent essentiellement en surface avec un front cylindrique dont l’axe est perpendiculaire à la surface.

Il existe deux types d’amortissement :

- Les différentes ondes s’amortissent en fonction de la distance à la source que l’on nomme **amortissement géométrique**. En surface, les ondes de volume P et S s’amortissent en $\frac{1}{R^2}$. Les ondes de surface s’atténuent moins vite en $\frac{1}{\sqrt{R}}$ avec R distance à la source, ce qui les rend identifiables à des distances importantes (figure 2.15). En profondeur, les ondes de volume P et S s’amortissent en $\frac{1}{R}$, les ondes de surface étant guidées par la surface, elles ne présentent pas d’atténuation en profondeur. Les ondes de surface résulte de la combinaison d’onde P et S.

Ainsi les termes $\frac{1}{R}$ et $\frac{1}{R^2}$ se trouve dans la solution théorique de propagation des ondes de Rayleigh (Semblat & Pecker (2009) équation 3.133).

- Il existe aussi un amortissement fonction des propriétés intrinsèques du matériau, nommé aussi l’**amortissement matériel**. Ce dernier reflète

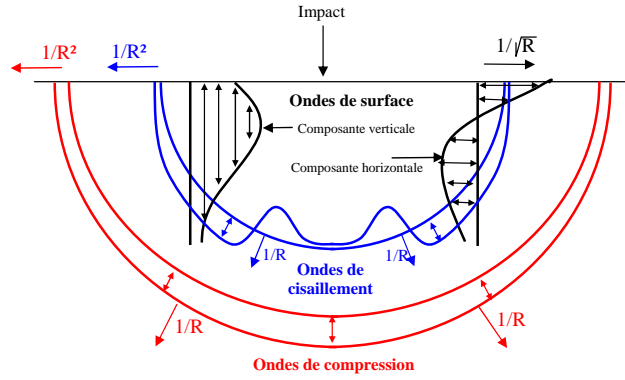


Figure 2.15 – Amortissement géométrique - Distribution des déplacements des ondes générées par une source ponctuelle à la surface d'un demi-espace homogène et isotrope - Woods (1968)

la dissipation d'énergie à travers des mécanismes tels l'amortissement visqueux et l'amortissement hystérétique. Le premier est proportionnel à la vitesse relative des particules et le second au déplacement relatif des particules.

L'amortissement matériel est défini par les principes de correspondance (théorie de la viscoélasticité) où les fonctions de réponse en fréquence du système amorti peuvent être obtenues pour les systèmes élastiques en écrivant les modules analogues à des systèmes élastiques comme des quantités complexes.

Les constantes de Lamé complexes λ^* et μ^* (équation 2.26 et 2.27) peuvent être renseignées dans l'équation 2.9 à la page 38 et peuvent être écrites de la façon suivante :

$$\lambda^* + 2\mu^* = (\lambda + 2\mu)(1 + 2iD_p) \quad (2.26)$$

$$\mu^* = \mu(1 + 2iD_s) \quad (2.27)$$

avec

- D_p : taux d'amortissement hystérétique des ondes P,
- D_s : taux d'amortissement hystérétique des ondes S.

Pour évaluer l'amortissement des ondes, il est indispensable d'intégrer l'ensemble du signal et non de prendre une valeur maximale du signal. Ainsi on considère l'énergie du signal en déterminant l'intégrale du signal au carré ou intensité d'Arias (Arias, 1970; Brgm, 2009; Derras, 2011) et non la vitesse maximale de chaque capteur. Dans le cas d'un milieu avec une loi de comportement linéaire, l'énergie est proportionnelle au carré de l'amplitude du signal :

2.5 Conclusion

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} a(t)^2 dt \quad (2.28)$$

avec :

- I_A : intensité d'Arias,
- g : accélération due à la pesanteur,
- T_d : durée du signal,
- $a(t)$: mouvement.

Si l'on considère une loi de comportement linéaire, la décroissance spatiale du champ d'onde (amortissement de l'amplitude en fonction de la distance à la source) répond à l'équation de la forme ([Chammas, 2002](#)) :

$$A(x) = A_0 \exp^{-\left\{\frac{\omega x}{2VQ_1}\right\}} \quad (2.29)$$

avec :

- A : l'amplitude du déplacement,
- Q_1 : le facteur de qualité,
- ω : la pulsation,
- x : la distance à la source,
- A_0 : l'amplitude initiale,
- V : la vitesse de propagation de l'onde.

Normaliser l'énergie des signaux sismiques consiste à faire le rapport de chaque enregistrement mesuré par les géophones sur une valeur constante définie dans notre cas comme la valeur maximale de ces signaux. Ce traitement appelé normalisation de la trace par rapport à son maximum permet ainsi de comparer des essais réalisés avec des énergies variables en normalisant.

2.5 Conclusion

Les méthodes sismiques sont des méthodes non destructives qui ont en génie civil pour principale vocation la reconnaissance des massifs de fondation pour l'implantation future d'ouvrages. Elles sont bien souvent utilisées en association avec d'autres techniques dans le cadre de la reconnaissance d'aquifères, de la caractérisation de la rippabilité des terrains, de recherche indirecte de matériaux (matériau de carrières et recherche de pétrole). Les ondes de surface représentent la partie la plus énergétique des signaux générés en surface, généralement considérée comme signal indésirable pour les autres techniques car il constitue le bruit qui peut masquer les arrivées des ondes réfractées.

L'amplitude de ces ondes est grande en surface et décroît exponentiellement avec la profondeur car ces ondes sont guidées par la surface libre. Elles sont donc adaptées à l'étude des couches superficielles.

Ces ondes présentent une dispersion géométrique liée à la nature hétérogène des sols stratifiés. La vitesse de phase V_R des ondes de surface est alors fonction de la fréquence f . C'est ce phénomène, appelé dispersion, qui est mis à profit dans les méthodes de reconnaissance. La vitesse des ondes sismiques est fortement dépendante de la nature des matériaux et de la densité. Dans ce contexte, en considérant une source faiblement énergétique conduisant à de très petites déformations s'apparentant à un comportement de milieu élastique, les expérimentations décrites dans le chapitre 3 vont s'attacher :

- dans un premier temps à décrire l'instrumentation déployée sur le ballast. Ces mesures n'étant pas conventionnelles, elles sont au stade de la recherche ; la littérature est très succincte à ce sujet ;
- dans un second temps à étudier les méthodes sismiques classiques en regardant la variation des vitesses de propagation dans un ballast compacté et dans un ballast non compacté, ceci pour les ondes de compression mais aussi pour les ondes de surface en déterminant les courbes de dispersion de la structure de voie avec ballast ;
- à comparer la réponse vibratoire du ballast, milieu discret, avec celle d'un milieu continu type sable sur une expérimentation de mêmes dimensions géométriques.

Cette première approche a pour objectif de déterminer les points faibles de la voie vis-à-vis de l'état de serrage du ballast ferroviaire en réalisant des mesures relatives sur la voie. Cette auscultation qualitative pourrait conduire à des mesures quantitatives après un calage des paramètres.

Les travaux réalisés au Kansas Geological Survey ([Park et al., 1997, 2001, 2007](#)) montrent un avenir prometteur de ces méthodes en automatisant sur site l'installation des géophones et en déplaçant l'ensemble ce qui conduit à imaginer l'instrumentation d'un véhicule roulant sur les voies ferrées pour quantifier leurs caractéristiques par la propagation d'ondes mécaniques.

Analyse expérimentale de la réponse dynamique d'une structure ballastée

3.1 Introduction

Ce travail de thèse, portant sur la caractérisation de l'état de serrage du ballast ferroviaire, a été mené dans le cadre de l'opération de recherche IFST-TAR 11S105 intitulée "Voie d'Infrastructure Ferroviaire" au Centre d'Expérimentation et de Recherche de Rouen.

Des structures ferroviaires à l'échelle 1 ont été mises en œuvre : elles ne comportent pas de panneau de voie c'est-à-dire qu'elles sont sans rail ni traverse, et sont dénommées ci-après "planches". Ces dernières peuvent comporter des zones avec du ballast mis en œuvre suivant des objectifs de compactage différents que l'on appelle plots.

Deux états extrêmes de compactage ont été mis en place :

1. ballast dit "**compacté**" comportant du ballast mis en œuvre par couche de 15 cm avec un objectif de compactage "q4" ([Corté et al., 2000](#)),
2. ballast dit "**foisonné**" correspondant à du ballast déposé par couche de 30 cm, sans compactage.

Les objectifs des expérimentations, représentés en partie sur la figure [3.1](#) sont les suivants :

- étudier la réponse dynamique dans le ballast (vitesse de propagation des ondes de volume et des ondes de Rayleigh),
- étudier la transmission verticale dans le ballast jusqu'à la sous-couche,
- comparer deux planches aux dimensions similaires, une avec du ballast en surface et l'autre avec du sable,
- étudier la faisabilité des méthodes sismiques existantes pour quantifier l'état de serrage du ballast (sismique réfraction, rapport spectral H sur V, courbe de dispersion).

Les structures expérimentales de cette étude sont décrites en Annexe [B.1](#).

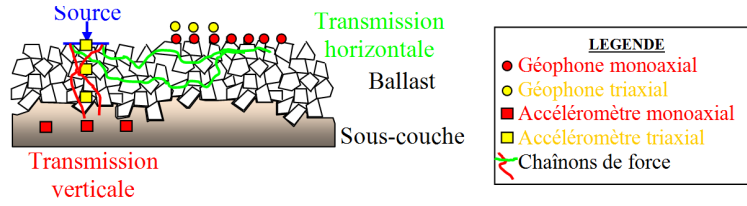


Figure 3.1 – Schéma synthétique de l'expérimentation

Ces expérimentations sont nommées planche 1, 2 3 et 4. Elles représentent une voie ferroviaire à l'échelle 1, sans panneau de voie, afin de n'étudier que la réponse dynamique du ballast (et sable) et sa sous-couche. On se place dans l'hypothèse d'un milieu continu élastique sans déplacement des éléments de ballast.

3.2 Instrumentation sismique de la structure expérimentale

3.2.1 Introduction

Le principe des mesures sismiques est représenté sur la figure 3.1. Les dispositifs de mesure mis en place sur le ballast et sur la structure expérimentale sont décrits sur la figure 3.2.

3.2.2 Choix des fréquences et des sources

Le choix de la fréquence des sources utilisées pour cette expérimentation tient compte de la dimension des éléments de la couche à ausculter :

- la taille des grains qui définit la longueur d'onde minimale ($\lambda_{min} \sim 5$ cm avec d_b =diamètre min particule ballast = 2,5 cm)
- l'épaisseur de la couche de ballast qui définit la longueur d'onde maximale ($\lambda_{max} \sim 60$ cm).

De façon empirique, il convient que la longueur d'onde soit supérieure ou égale à deux fois l'épaisseur de l'élément à ausculter (figure 3.3). En considérant un milieu continu, la longueur d'ondes de Rayleigh est fonction de la fréquence d'émission et de la vitesse de propagation suivant la relation :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

En prenant comme hypothèse $V_{ballast} \in [90 - 450]$ m/s (vitesse d'un milieu granulaire sableux, Mari et al. (1998)), la bande de fréquence de la source à utiliser est donnée dans le tableau 3.1.

3.2 Instrumentation sismique de la structure expérimentale

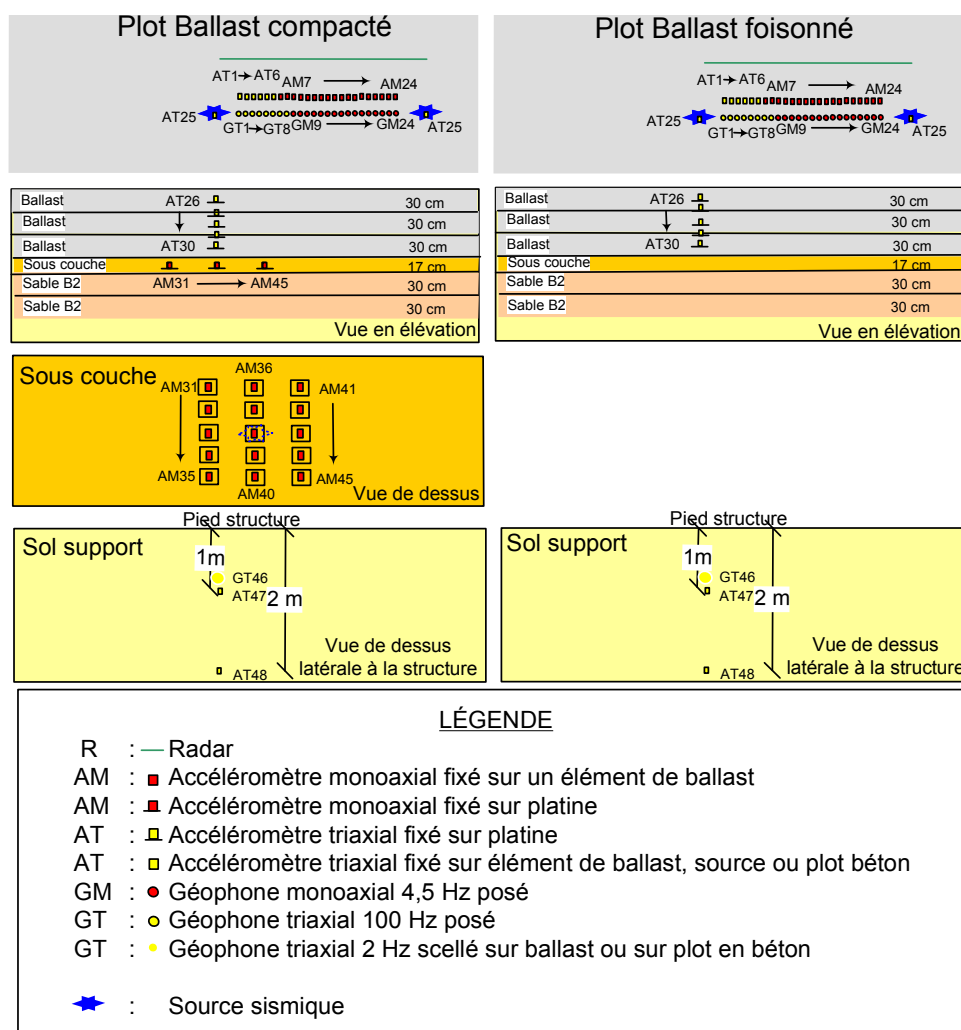


Figure 3.2 – Instrumentation sismique de la structure ferroviaire (planches 1 et 2)

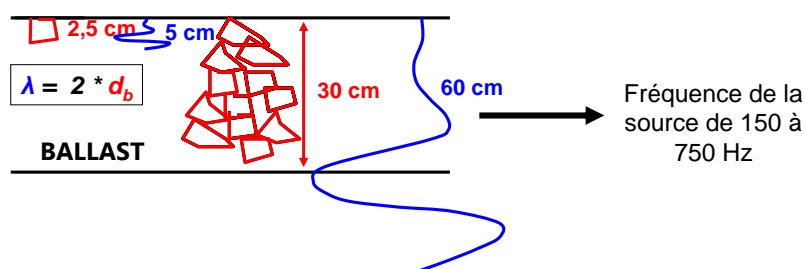


Figure 3.3 – Auscultation et longueur d'onde

Cette première approche indique qu'il convient d'utiliser une source avec une fréquence de sollicitation élevée afin de générer une longueur d'onde correspondant à deux fois l'élément ausculté (de 150 à 750 Hz pour la couche de ballast et de 1800 à 9000 Hz pour l'élément de ballast).

3 Expérimentations pour l'étude du ballast

Tableau 3.1 – Bande de fréquences utile pour une couche de 30 cm de ballast

$V_{ballast}$ (m/s)	Taille éléments (cm)	λ (cm)	f (Hz)
90	2,5	5	1800
	30	60	150
450	2,5	5	9000
	30	60	750

Plus la fréquence de sollicitation se rapproche de la fréquence correspondant à l'élément de ballast, plus les ondes se diffractent dans le milieu granulaire. Il est ainsi préférable de se placer dans une bande de fréquence plus faible car la longueur d'onde est plus importante, ce qui permet de se rapprocher de l'hypothèse de milieux continus. La source doit ainsi nécessairement générer des fréquences inférieures à 750 Hz utile pour ausculter une épaisseur de couche de 30 cm de ballast.

A l'issue d'une recherche bibliographique, les sources suivantes ont été définies pour faire une étude comparative de différentes sollicitations :

- Marteau vertical répétable :
 - hauteur : 70 cm,
 - support impactant scellé : disque acier creux.
- Sollicitation horizontale répétable - boule lâchée dans un tube impactant un bastaing en bois :
 - hauteur : 1,1 m,
 - support de l'impactant : bastaing bois.
- Chute d'une boule en acier :
 - hauteur : 77 cm,
 - support de l'impactant : disque acier creux.
- Vibreur pneumatique lesté avec des billes de plomb :
 - support de la source sismique : berceau en acier,
 - vibreur pneumatique de marque vibrafrance VEP600 couplé à un compresseur de 2200 l/min à 6-7 bars, d'un poids de 6,6 kg générant une force centrifuge en charge de 530 kg à une fréquence maximale de 17 000 tr/min soit 280 Hz.
- Vibreur inertiel
 - support de la source sismique : plaque en acier carrée.

Le choix de ces sources tient au type de source (impulsionnelle ou entretenue) générant des signaux à large bande fréquentielle (de 0 à 400 Hz) pour les

3.2 Instrumentation sismique de la structure expérimentale

premières et monofréquentiel (280 Hz pour le vibreur pneumatique et défini de 300 à 500 Hz ou par rampe en fréquences suivant l'essai pour le vibreur inertiel); l'intérêt de cette dernière source étant de moduler la fréquence de sollicitation.

Il est à noter que ces différentes sources ne présentent pas le même niveau d'énergie : le marteau et la chute de masse représentent un effort de 1 kN, le vibreur inertiel de 0,66 kN et le vibreur pneumatique de 7 kN. Il est important de souligner la différence dans la mise en place de ces sources; les sources impulsionnelles étant plus faciles à exécuter.

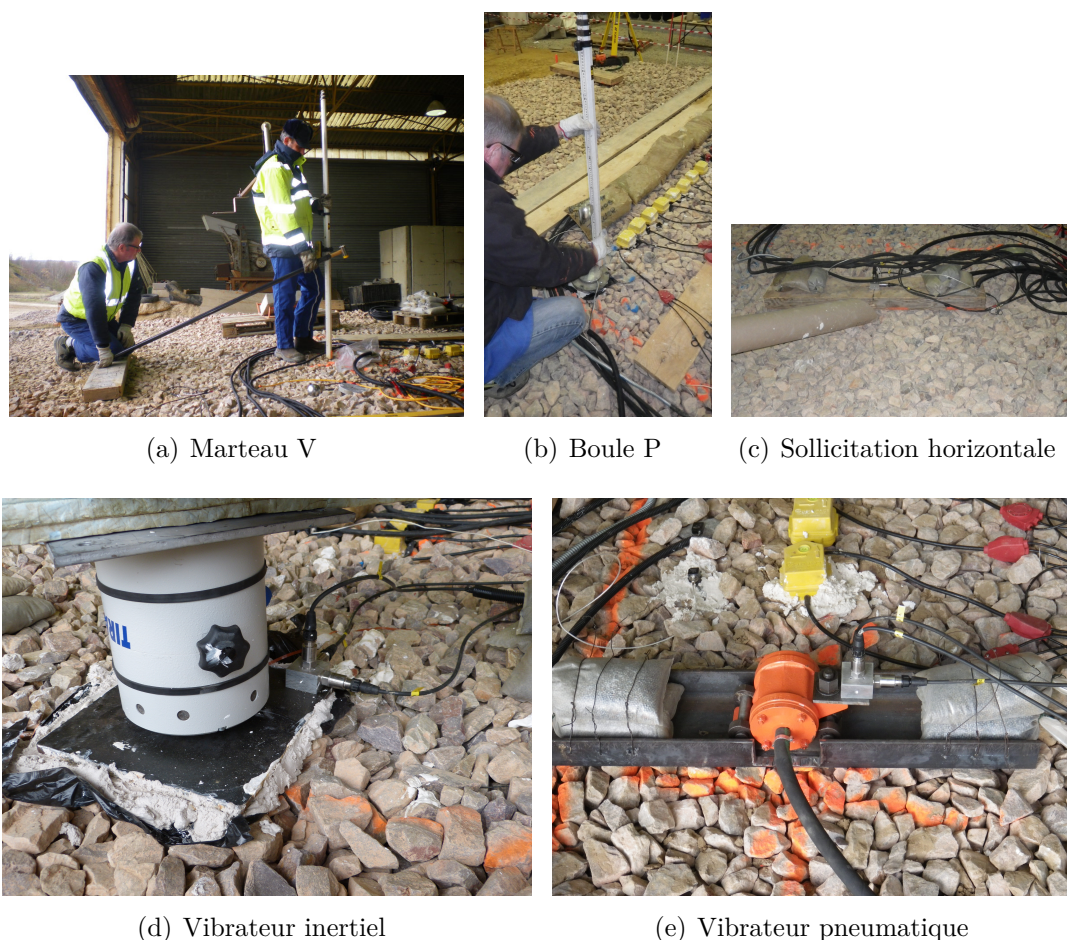


Figure 3.4 – Sources faiblement énergétiques sans panneau de voie

3.2.3 Choix des capteurs

Les capteurs retenus pour cette expérimentation doivent permettre de mesurer la bande passante en fréquence définie suivant la source et la vitesse de propagation du milieu. Un étalonnage des géophones et accéléromètres a été réalisé afin de vérifier la bande passante et le déphasage de ces capteurs dans

la bande utile en fréquence (annexe B.3). Ce dernier montre la validité des deux types de capteurs sur une bande passante de 50 à 800 Hz.

3.2.3.1 Instrumentation à la source

Les cinq sources faiblement énergétiques (figure 3.4) par rapport à la sollicitation d'un train sont instrumentées au moyen de trois accéléromètres (planche 1, 2 et 4 - figure 3.5) et d'un géophone monoaxial à proximité de la plaque (planche 3 - figure 3.6), ceci afin de caractériser la source. La valeur mesurée à la source permet de faire le rapport des données obtenues à chaque capteur avec cette donnée, ce qui permet de comparer les sources entre elles en normalisant la valeur maximale. On parle de fonction de transfert quand on fait une analyse fréquentielle et l'on dit que l'on normalise les essais.

Le capteur de la source doit nécessairement présenter le même type de capteur que le reste de la flûte sismique. Dans le cas contraire, il est possible de traiter le signal dans le domaine fréquentiel afin de corriger les signaux suite à leur intégration ou dérivation. Deux types d'instrumentation à la source ont été réalisées :

- sur les planches 1, 2 et 4, la source est caractérisée par un accéléromètre alors que la flûte sismique comprend des géophones. Dans ce contexte, la mesure en accélération à la source est convertie en vitesse en intégrant le signal une fois. Ce traitement semble simple dans la théorie pour un signal monofréquentiel mais il s'avère complexe pour un signal large bande (paragraphe 3.3.5 à la page 87). Des traitements complémentaires seraient nécessaires en réalisant l'intégration des signaux dans le domaine fréquentiel plutôt que dans le domaine temporel ;
- sur la planche 3, l'excitation est caractérisée au moyen d'un géophone placé à côté de la source (figure 3.6).



Figure 3.5 – Instrumentation du support de l'impactant du marteau et de la chute de masse

3.2 Instrumentation sismique de la structure expérimentale

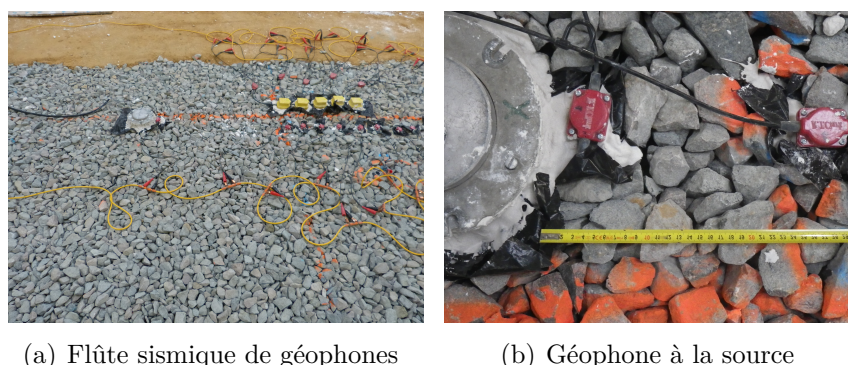


Figure 3.6 – Instrumentation des sources marteau/chute de masse avec un géophone - planche 3

3.2.3.2 Capteurs en surface sur le ballast

Des géophones et des accéléromètres ont été utilisés pour instrumenter la surface du ballast afin de comparer ces deux technologies. Suite au dépouillement des différentes planches, l'instrumentation à la surface du ballast a été optimisée chronologiquement de la façon décrite dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 – Instrumentation en surface des différentes planches

Planche	Type matériau	Épaisseur matériau	Instrumentation
P1	Ballast	30	8 GT 24 GM
P2	Ballast	30-60-90	8 GT + 16 GM 6 AT + 10 AM
P3	Ballast	80	5 GT 24 GM
P4	Sable	30	8 GT + 16 GM
G : Géophones - A : Accéléromètres - M : Monoaxiaux - T : Triaxiaux			

Sur la planche 1, huit géophones sont utilisés pour ausculter une épaisseur de 30 cm de ballast. Ce nombre n'est cependant pas suffisant pour obtenir des courbes de dispersion présentant une bonne résolution (figure 3.47 à la page 102). Les règles de l'art préconisent au moins 24 géophones pour investiguer correctement un site. Les résultats de la planche 1 ont conduit à compléter notre dispositif pour atteindre 24 géophones.

Géophones Des tests de fixation de capteurs ont été réalisés sur la planche 1 pour étudier quelle était la configuration optimale (figure 3.7 et paragraphe 3.3.5.4 à la page 92) : géophones scellés ou géophones posés.

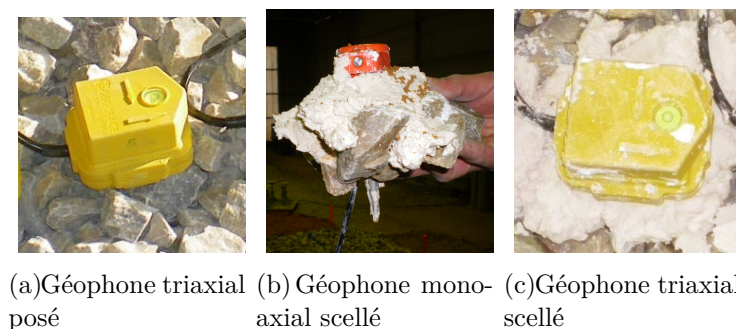


Figure 3.7 – Méthodes de fixation des géophones

Accéléromètres Les accéléromètres, plus petits que les géophones, doivent être fixés sur un élément de ballast. En premier lieu, nous avons utilisé une colle poudreuse (phényl salicylate) chauffée dans un récipient pour la rendre liquide et versée sur une face plane d'un granulat de ballast. L'accéléromètre est posé sur cette colle en maintenant une pression de contact. Cette fixation rapide ne permet pas de répondre à des contraintes de cisaillement auxquelles les capteurs peuvent être soumis, rendant ainsi la fixation défectueuse. Aussi, nous avons opté pour une fixation mécanique des accéléromètres en perçant les granulats de ballast puis en collant une vis taraudée permettant de fixer les accéléromètres. Afin d'améliorer les contacts entre granulats à la surface, nous avons enfoncé l'élément instrumenté dans le ballast en retirant quelques granulats et nous avons chargé statiquement le ballast au moyen de sacs de sable (figure 3.8).

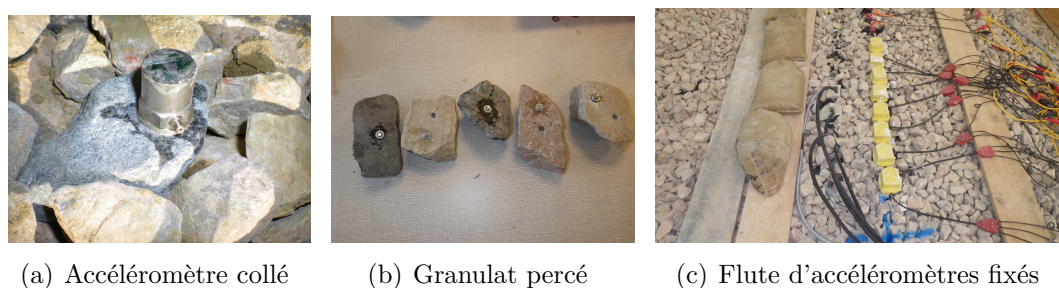


Figure 3.8 – Modes de fixation des accéléromètres sur les granulats de ballast et chargement statique au moyen de sacs de sable

La réponse d'un granulat de ballast reflète les résultats obtenus avec les géophones posés. Ce retour d'expérience permet de comprendre aisément que cette instrumentation se rapproche du comportement réel du ballast ; mais les résultats sont difficilement exploitables avec les méthodes des milieux continus et il est préférable de moyenniser la transmission en scellant le granulat au plâtre. Pour confiner les granulats entre eux, un chargement statique est réalisé

3.2 Instrumentation sismique de la structure expérimentale

par application de sacs remplis de sable (figures 3.8 et 3.9). La flûte sismique d'accéléromètres matérialisée par les sacs de sable sur la photographie de la figure 3.9 est parallèle à la flûte sismique de géophones.

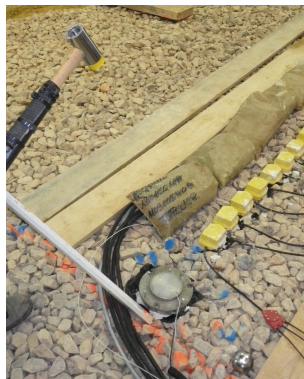


Figure 3.9 – Instrumentation à la surface du ballast - planche 2

Le scellement au plâtre donne ainsi une indication moyennée de la réponse de la propagation de l'onde (figure 3.41).

Choix du type de capteur Suite aux résultats obtenus avec les deux types de capteurs, nous avons privilégié la flûte de géophones par rapport aux accéléromètres. La flûte sismique de géophones est en effet plus robuste et plus facile à mettre en œuvre pour une mesure sur chantier expérimental. Les accéléromètres utilisés ne sont pas suffisamment sensibles et la fragilité des câbles ne permet pas d'obtenir l'ensemble des enregistrements.

3.2.3.3 Accéléromètres dans le ballast - planche 2

Les couches de ballast du plot compacté sont instrumentées au moyen de cinq accéléromètres triaxiaux fixés sur une platine et protégés par un capot (figure 3.10). Ils sont disposés aux interfaces des trois couches de ballast avant la mise en œuvre de la couche susjacente et au milieu de chaque couche après compactage et décaissement de 15 cm.



(a) En milieu de couche (b) Entre deux couches

Figure 3.10 – Accéléromètres dans le ballast - planche 2

3.2.3.4 Accéléromètres dans la sous-couche - planche 2

La sous-couche de la planche 2 a été instrumentée avec 15 accéléromètres monoaxiaux en milieu de couche du côté plot compacté (figure 3.11) afin d'étudier la décroissance d'amplitude à travers le ballast. Trois lignes d'accéléromètres sont installées au milieu de la sous-couche ferroviaire. Chaque ligne comprend 5 accéléromètres répartis sur 2,5 m, longueur correspondant à celle d'une traverse. Elles sont espacées de 60 cm comme la distance inter-traverse d'une voie ferrée. L'accéléromètre central de ce réseau de capteurs est positionné à l'aplomb de l'essai avec un offset de 25 cm (cercle bleu sur figure 3.11). Ainsi je parle de traverse centrale, gauche et droite pour les trois lignes d'accéléromètres afin de mieux comprendre la position des accéléromètres dans la sous-couche.

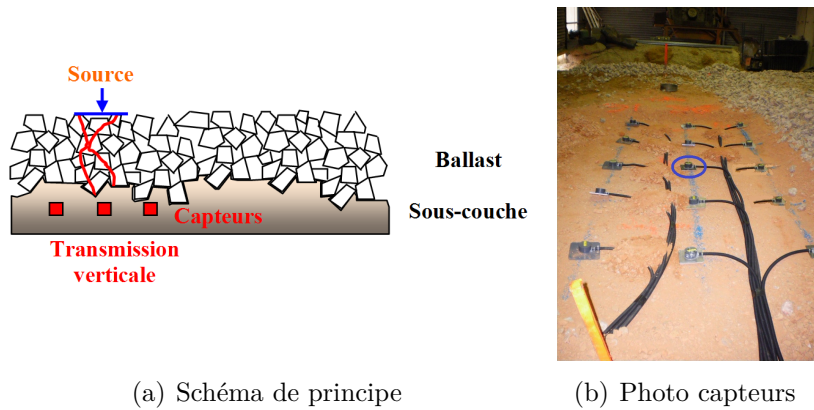


Figure 3.11 – Accéléromètres positionnés au milieu de la sous-couche - planche 2

3.2.3.5 Capteurs en dehors de l'emprise de la structure ferrée - planche 2

Deux plots en béton de 30x30x30cm ont été coulés à 1 et 2 m du pied de la planche 2 à l'aplomb du ballast compacté et du ballast foisonné afin de fixer 2 géophones triaxiaux (à 1 m) et 2 accéléromètres (à 1 et 2 m) (figures 3.12 et 3.13).

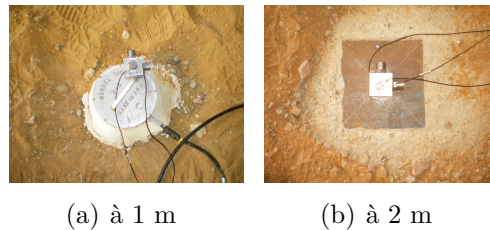


Figure 3.12 – Instrumentation en dehors de la planche 2 à une distance connue du pied du remblai

3.2 Instrumentation sismique de la structure expérimentale

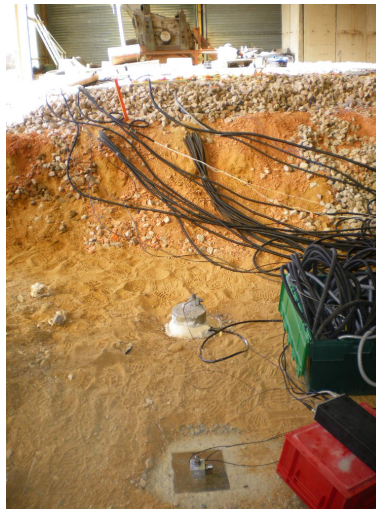


Figure 3.13 – Vue transversale de la planche 2, plot compacté, dans l'axe des capteurs hors de l'emprise du remblai

Il est important de noter que seules les mesures avec les géophones ont pu être exploitées; celles au moyen des accéléromètres sont trop peu sensibles et sortent très peu du bruit de fond.

3.2.4 Choix du dispositif de mesure sismique : méthode MASW

La courbe de dispersion des ondes de Rayleigh peut être obtenue à partir de la méthode d'analyse spectrale des ondes de surface (Spectral Analysis of Surface Waves - SASW) à l'aide d'une source et de deux récepteurs (géophones ou accéléromètres).

Dans notre cas d'étude, nous utilisons 24 géophones, évitant ainsi de déplacer les deux capteurs. Cette méthode est ainsi nommée MASW "Multichannel Analysis of Surface Waves".

Les dimensions et caractéristiques du dispositif de mesure en onde de surface peuvent être définies par les critères du tableau 3.3 décrits sur la figure 3.14.

La valeur de l'offset "o" est capitale pour une bonne mesure :

- le tir doit être suffisamment éloigné des capteurs pour avoir une bonne séparation des ondes (Rayleigh, P, et S),
- le tir ne doit pas être trop éloigné car le rapport « signal sur bruit » diminue et, dans ce cas, les ondes des modes supérieurs peuvent être plus énergétiques que le mode fondamental. Un offset égal à 20 % de la longueur du dispositif convient dans la plupart des cas. Pour notre dispositif de 3,45 m de longueur, il convient de prendre un offset de 21 cm.

3 Expérimentations pour l'étude du ballast

Le milieu n'étant pas connu, il convient de paramétrer le dispositif au préalable d'une mesure. Ainsi, des mesures avec des offsets différents ont été réalisées afin de déterminer l'offset le plus adapté.

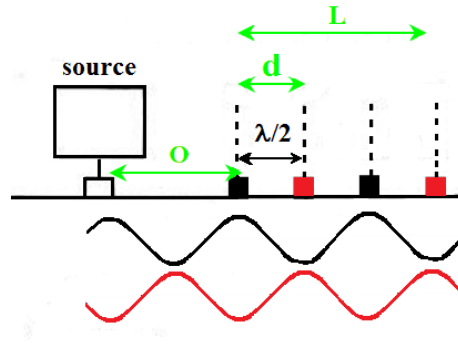


Figure 3.14 – Schéma des paramètres du dispositif sismique

Tableau 3.3 – Paramètres du dispositif sismique (Heisey & Meyer, 1982; Tokimatsu et al., 1991)

Paramètre influents	Paramètres influencés	Méthode	Critère	Cas d'étude 8 géo	Cas d'étude 24 géo
Longueur du dispositif (L)	Plus grande longueur d'onde (λ_{max}) Profondeur d'auscultation (Z_{max})	Empirique	$\lambda_{max} = 2L$ $Z_{max} = \frac{L}{3}$	$\lambda_{max} = 2,1\text{m}$ $Z_{max} = 0,7\text{m}$	$\lambda_{max} = 6,9\text{m}$ $Z_{max} = 2,3\text{m}$
Écartement des géophones ($d = 15\text{ cm}$)	Plus petite longueur d'onde (λ_{min})	Empirique	$\lambda_{min} = 2d$ $Z_{min} = \frac{\lambda_{min}}{3}$	$\lambda_{min} = 30\text{cm}$ $Z_{min} = 10\text{cm}$	
		Critère de Heisey	$\frac{d}{2} < \lambda < 3d$	$7,5\text{ cm} < \lambda < 45\text{ cm}$	
		Règle de Tokimatsu	$\frac{\lambda_{max}}{4} \leq L$ $\frac{\lambda_{min}}{16} < d < \lambda_{min}$	$52\text{ cm} \leq L\text{ m}$ $1,8\text{ cm} < d < 30\text{ cm}$	
Offset de la source (O)	Qualité de la mesure	Empirique	$O = 20\%L$	$O = 21\text{cm}$	$O = 69\text{cm}$

3.2.5 Choix du dispositif de mesure H/V

Plusieurs méthodes existent pour caractériser un site : on peut citer la méthode des rapports spectraux ainsi que deux méthodes H/V (la méthode des fonctions récepteurs dite "H/V événement" et la méthode du bruit de fond ambiant). Ces méthodes expérimentales permettent de déterminer la fréquence de résonance ainsi qu'une vitesse d'ondes de cisaillement caractéristique des matériaux de ce site. Le traitement des rapports spectraux (Borcherdt, R.D., 1970) consiste à évaluer la fonction de transfert du déplacement en surface. Pour cela, il convient de calculer le rapport spectral de la réponse mesurée au

3.2 Instrumentation sismique de la structure expérimentale

toit du matériau meuble sur celui mesuré en un point du matériau affleurant considéré comme le rocher.

Ces trois méthodes sont étudiées dans la thèse de [Kham \(2004\)](#). Seules les deux méthodes H/V seront étudiées ici (H/V bruit de fond et H/V évènement). La méthode des rapports spectraux ($H_{\text{matériau-meuble}}/H_{\text{rocher}}$) pourra être une perspective à venir des travaux réalisés.

Méthode H/V bruit de fond Cette technique consiste à mesurer les vibrations ambiantes avec des capteurs de vitesse très sensibles à 3 composantes. Ces derniers permettent d'enregistrer le mouvement du sol dans les trois directions, puis à comparer leur contenu fréquentiel en effectuant le rapport des spectres de Fourier des composantes horizontales et verticales ou rapport "H/V". L'expérience et la théorie montrent que, pour des sols à faibles caractéristiques mécaniques reposant sur un substratum rigide, le rapport H/V présente un pic marqué à une fréquence f_0 , appelée fréquence de résonance du site, qui est fonction de l'épaisseur et de la rigidité des sols mous susjacentes.

La méthode H/V bruit de fond est décrite dans le rapport technique du LGIT de [Bard, Pierre-Yves et al. \(2009\)](#). Les principales étapes de cette méthode sont les suivantes :

- sélection de fenêtres stationnaires identiques sur les composantes horizontales et verticales conduisant à éliminer les évènements transitoires,
- calcul des spectres de Fourier de chaque composante et sur chaque fenêtre, puis lissage avec un filtre passe-haut 1 Hz,
- calcul de la moyenne quadratique des composantes horizontales de chaque fenêtre,
- calcul des rapports spectraux H/V des différentes fenêtres stationnaires,
- calcul de la moyenne et de l'écart-type des rapports spectraux H/V de toutes les fenêtres.

Cette méthode permet d'investiguer de grandes profondeurs car les fréquences d'émission sont très faibles. Le bruit de fond sismique a des origines naturelles (marée, houle, vent, etc) ou anthropiques (trafic, usine, etc.). Les fréquences de ce bruit ambiant sont faibles. Elles sont inférieures à 1 Hz pour les phénomènes naturels et supérieures à 1 Hz pour les origines anthropiques ([Meric, 2006](#)).

Dans notre cas, cette méthode est moins adaptée aux dimensions de notre étude car les fréquences sont trop faibles pour une auscultation en surface. Néanmoins, il est possible d'utiliser cette méthode en générant du bruit de fond à plus haute fréquence (essais planche 3 en marchant à proximité de la flûte de géophones ou en tapant autour du plot au moyen d'un marteau).

Méthode H/V évènement (ou "fonctions récepteurs") Ce traitement consiste à étudier la faisabilité de la méthode H/V évènement en générant une

3 Expérimentations pour l'étude du ballast

sollicitation à fréquence élevée (comprise entre 0 et 400 Hz), à la différence de la méthode H/V bruit de fond (fréquence ≤ 1 Hz), pour un contexte à faible épaisseur et ainsi étudier si l'état de serrage du ballast engendre un décalage du pic de résonance.

Dans tous les cas, la fréquence de résonance d'un site dépend de l'épaisseur et de la vitesse de cisaillement V_S du matériau meuble subjacent selon la relation ci-après (Haskell, 1960; Aki & Richards, 1980) :

$$f_0 = \frac{V_S}{4H} \quad (3.2)$$

avec

- H : épaisseur de la couche supérieure,
- V_S : vitesse des ondes de cisaillement de la couche supérieure.

Dispositifs H/V de l'étude Dans ce contexte, nous avons instrumenté le ballast :

- des planches 1, 2 et 4 au moyen de 8 géophones triaxiaux afin d'étudier la faisabilité de la méthode H/V événement,
- de la planche 3 en augmentant le temps d'enregistrement afin de voir la faisabilité de la méthode H/V bruit de fond sur la réponse de 5 géophones triaxiaux.

Le rapport d'impédance entre les deux sols contrastés doit être supérieur ou égal à 4 (Wathelet et al. (2005), projet SESAME) afin que le pic H/V soit visible. Une structure ferrée ballastée présente un fort contraste d'impédance entre le ballast et les deux couches sous-jacentes. Le rapport d'impédance est en effet égal à environ huit, ce qui indique qu'une voie ferrée ballastée pourrait induire des phénomènes d'amplification des ondes.

Dans notre cas, en prenant une épaisseur H de ballast de 30 cm et une vitesse des ondes de cisaillement de 100 à 300 m/s, nous obtenons une fréquence de résonance de 40 à 250 Hz qui rentre dans la gamme de fréquence observée.

Brulé & Javelaud (2010) mettent en évidence la sensibilité du paramètre de densité sur des mesures de bruit de fond sismique. Ce travail a pour but de suivre, avec la méthode H/V, l'amélioration par pilonnage de la qualité d'un remblai d'une dizaine de mètres. Les relevés topographiques mettent en évidence un tassement compris entre 80 et 100 cm correspondant à un tassement de 5 à 10 % de la couche compressible. Il n'y a pas de modification significative de la fréquence de résonance f_0 du site suite au compactage, même si les essais mécaniques confirment un renforcement important du sol. Néanmoins, l'amplitude du rapport H/V varie d'environ 20 % ainsi que la vitesse des ondes de cisaillement obtenue à partir de mesures MASW (entre 0 et 5 m, V_S passe de 134 m/s avant travaux à 163 m/s après travaux). Ces mesures H/V "bruit de fond" sont donc sensibles au paramètre de compacité.

3.3 Résultats des mesures sismiques

Les méthodes sismiques classiques sont couramment utilisées par les géophysiciens pour caractériser les sols de grandes profondeurs (plusieurs dizaine de mètres). Dans le cas présent, nous envisageons d'appliquer ces méthodes pour de faibles épaisseurs (petites longueurs d'ondes) dans un cas de matériau discret tel le ballast.

Les principaux traitements de cette étude expérimentale sont décrits ci-après :

- Rapport spectral signal sur bruit,
- Ondes P (figure 3.15)
 - Arrivée des ondes (directe et réfractée) et calcul de la vitesse des ondes,
 - Amortissement des ondes,
- Ondes R
 - Courbes de dispersion
- Analyse du signal
 - Rapports spectraux H/V événement et bruit de fond,
 - Accélérations dans la sous-couche ferroviaire,

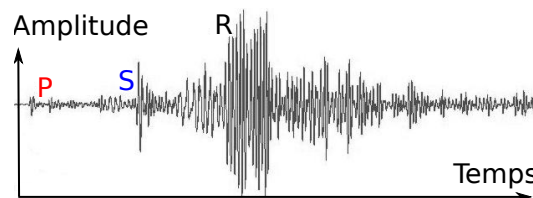


Figure 3.15 – Exemple d'enregistrement sismique

Il est à noter que de nombreux géophysiciens réalisent des transformations temps-fréquence afin de décrire le contenu des ondes sismiques en les séparant par segmentation de l'image temps-fréquence associée à une trace ([Roueff, 2003](#)) ; ce traitement n'est pas réalisé.

3 Expérimentations pour l'étude du ballast

3.3.1 Synthèse des résultats de mesures sismiques

Les tableaux 3.4, 3.5, 3.6 et 3.7 présentent une synthèse de l'instrumentation des différentes planches et des résultats (en vert : les résultats satisfaisants et en rouge : les résultats non exploitables).

30 cm de ballast compacté et foisonné				
Nb géophones	Nb essais	Sources	Offsets	Résultats
8 GT	3	MarteauV	15	Réfraction
		Vibrateur P	25	MASW
		Vibrateur I	35	H/Vévènement ?
			45	Pic à 1000 et 1500 Hz
24 GM Ifsttar	Enregistrements avec sources face aux 8G3D			?
	Quelques essais	Vibrateur I	48	Réfraction
				MASW
Nombre d'essais = 100				

Tableau 3.4 – Synthèse des essais et résultats de la planche 1

30 - 60 - 90 cm de ballast compacté et foisonné				
Nb géophones	Nb essais	Sources	Offsets	Résultats
8 GT +16 GM	5	MarteauV	25	Réfraction
		BouleP	35	MASW
		MarteauH	45	H/Vévènement
		Vibrateur P	55	
6 AT + 10 AM		Vibrateur I	110	
Nombre d'essais = 750				

Tableau 3.5 – Synthèse des essais et résultats de la planche 2

80 cm de ballast compacté et foisonné				
Nb géophones	Nb essais	Sources	Offsets	Résultats
24 GM	5	MarteauV BouleP	25	Réfraction
5 GT			55	MASW
			110	H/V BDF
Nombre d'essais = 60				

Tableau 3.6 – Synthèse des essais et résultats de la planche 3

30 cm de sable compacté				
Nb géophones	Nb essais	Sources	Offsets	Résultats
8 GT +16 GM	5	MarteauV Vibrateur P Vibrateur I	25	Réfraction
			35	MASW
			45	
			55	
			110	
Nombre d'essais = 60				

Tableau 3.7 – Synthèse des essais et résultats de la planche 4

3.3 Résultats des mesures sismiques

3.3.2 Rapport signal sur bruit

Le rapport signal sur bruit (S/B) est un traitement spectral permettant de définir la gamme de fréquence valide pour une source donnée. Ce rapport est donné en décibels (dB) (équation 3.3).

Bande en fréquence utile :

$$\left(\frac{S}{B}\right)_{dB} = 20 \log \frac{FFT(S)}{FFT(B)} \quad \text{ou} \quad \frac{S}{B} = \frac{FFT(S)}{FFT(B)} \quad (3.3)$$

Limite :

$$\left(\frac{S}{B}\right)_{dB} = 10 \quad \text{ou} \quad \frac{S}{B} = 3 \quad (3.4)$$

Ainsi, pour un rapport $(S/B)_{dB}$ supérieur ou égal à 10 dB (équivalent à une valeur de 3 pour $\frac{S}{B}$), les valeurs mesurées sont représentatives de la source de sollicitation. La définition de ce rapport permet ainsi de connaître les limites de différents traitements sismiques.

Pour ce faire, l'arrivée de l'onde a été détectée automatiquement sur le signal de la source (paragraphe 3.3.3). À partir de ce point, un fenêtrage identique a été défini pour tous les géophones en prenant 200 échantillons avant et 4000 échantillons après ce point soit un total de 4201 échantillons correspondant à une fenêtre de temps de 0,21 s pour une fréquence d'échantillonnage f_e de 20 kHz.

Le graphe 3.16 montre que la bande passante utile sur le ballast avec une source impulsionnelle tel un marteau vertical est comprise entre 50 et 350 Hz pour les géophones éloignés de la source et de 50 à 500 Hz pour les géophones proches de la source. Il est donc inutile de traiter les signaux allant au delà de 500 Hz.

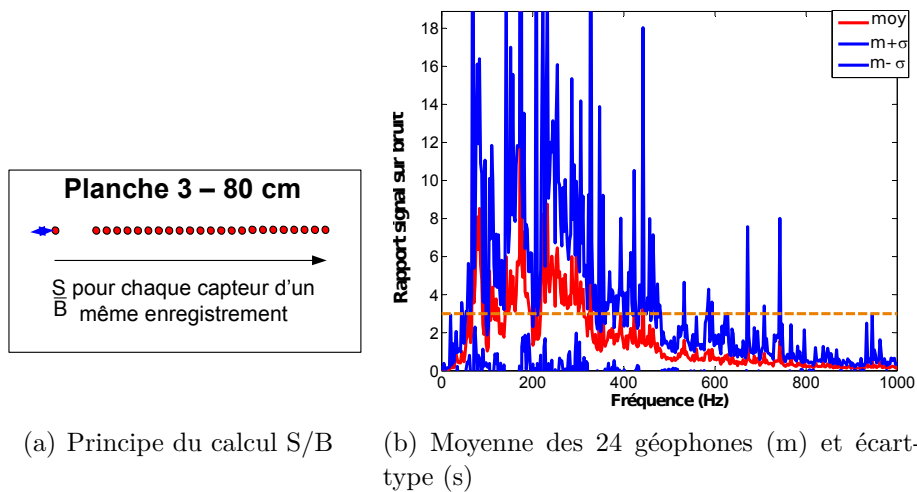


Figure 3.16 – Rapport signal sur bruit - planche 3 - marteau V - offset de 25 cm

3.3.3 Vitesse des ondes - hodochrone

La vitesse des ondes est calculée pour les sources ponctuelles en détectant automatiquement l'arrivée des ondes et en traçant l'hodochrone qui représente les temps d'arrivée des ondes en fonction de la distance. La détection de l'arrivée des ondes émises à partir de sources continues telles que les vibreurs est plus complexe et ne peut pas être déterminée de la même façon. L'annexe B.5 est consacrée à ce traitement. La définition de la vitesse apparente est décrite dans le paragraphe 2.2.2 à la page 38.

La détection est faite à l'aide d'un algorithme de détection de seuils développé sous le logiciel Matlab. Pour chaque géophone de la flûte sismique, le pic maximum et la valeur du bruit de fond sont déterminés pour définir la valeur temporelle à partir de laquelle l'enregistrement dépasse un seuil équivalent à 5 % du pic maximum. De cette façon automatique, nous avons réalisé les différents pointés. L'onde de compression, la plus rapide, fait ainsi l'objet de ce traitement.

Les nombreux essais de détection au moyen de la valeur seuil du pic maximum ont montré que la détection est correcte. Il serait toutefois nécessaire de réaliser un calcul de l'erreur sur la détection de l'arrivée de l'onde pour être statistiquement rigoureux.

Pour chaque enregistrement, l'arrivée des ondes est matérialisée par des croix rouges et une droite hodochrone (figure 3.17) met en relation le temps d'arrivée des ondes en fonction de la distance des géophones à la source. La vitesse apparente est la pente de l'hodochrone ou dromochronique.

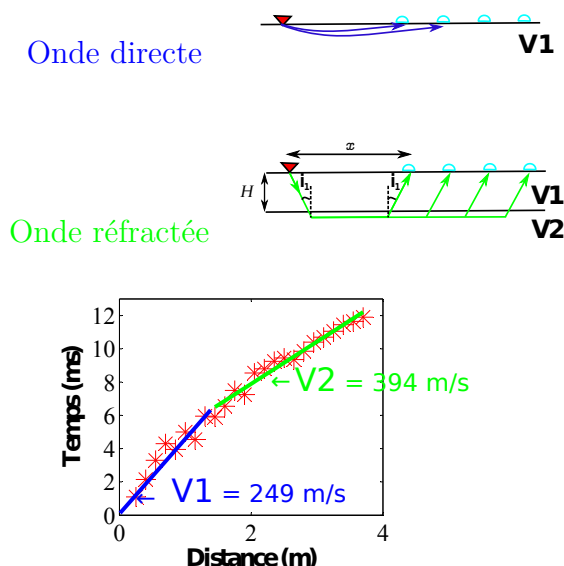


Figure 3.17 – Exemple d'hodochrone

La vitesse de propagation est obtenue après régression linéaire des deux sélections de points de même pente. La première pente concerne l'onde directe

3.3 Résultats des mesures sismiques

(droite passant par 0) tandis que la seconde pente représente l'onde réfractée (figure 3.18).

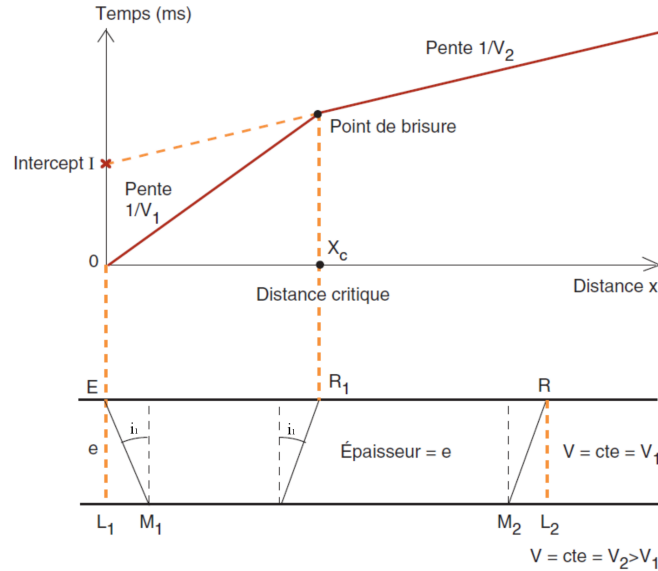


Figure 3.18 – Schéma de principe de la propagation des ondes dans un bicouche

Les exemples d'enregistrements sismiques sur le ballast (exemple 3.24) montrent qu'il est nécessaire d'avoir 8 géophones pour obtenir la vitesse V_1 du milieu subjacent et un nombre de 24 géophones permet d'obtenir la vitesse V_2 du milieu sous-jacent.

Le traitement de la planche 2 permet d'obtenir de bons résultats d'un point de vue sismique (détection de l'arrivée des ondes P) cependant la courbe de dispersion est perturbée en utilisant deux types de géophones sur la même flûte sismique.

Les résultats sismiques de la planche 3 sont de bonne qualité. Néanmoins, les courbes de dispersion ne présentent pas une bonne résolution montrant que le signal est bruité avec une épaisseur conséquente de ballast.

Le traitement au moyen de la flûte de la planche 4 permet d'obtenir de bons résultats d'un point de vue sismique (détection de l'arrivée des ondes P) mais aussi pour l'obtention de courbes de dispersion présentant une bonne résolution à partir des 16 géophones monoaxiaux, le matériau étant moins amortissant que le ballast.

3.3.3.1 Vitesse des ondes dans le ballast

Les différentes planches de ballast sont décrites dans l'annexe B.1.

A priori, nous pourrions croire que le ballast, milieu aux propriétés continument variables, pourrait se comporter comme une succession d'interfaces

3 Expérimentations pour l'étude du ballast

sur lesquelles pourraient se réfracter les ondes (articles traitent de ces phénomènes de diffraction multiple / diffusion : Margerin et al. (1998); Kham (2004); Larose (2006); Gouedard (2008)). Néanmoins, les résultats indiquent une prépondérance de deux horizons avec deux vitesses distinctes (vitesse de l'onde directe notée V_1 et vitesse de l'onde réfractée notée V_2).

Une moyenne de ces deux vitesses a été calculée pour les différents offsets avec un nombre de quatre essais pour chaque offset (25, 35, 45, 55 et 110 cm) soit environ une vingtaine d'essais (figure 3.19). Les résultats ont montré une limite de la mesure avec un offset (distance source/ géophone 1) de 1,1 m. Il apparaît en effet plus difficile de détecter correctement l'arrivée de l'onde réfractée sur les géophones plus éloignés car le rapport signal sur bruit est faible.

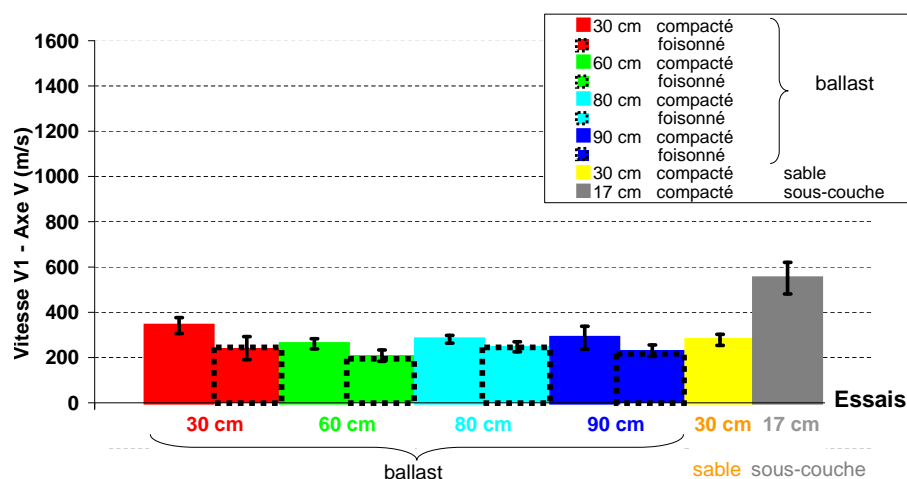


Figure 3.19 – Vitesse de propagation des ondes P directes dans le ballast (30, 60, 90 cm planche 2 et 80 cm planche 3), dans le sable (30 cm - planche 4), dans la sous-couche (17 cm - planche 3) - Marteau vertical

Tableau 3.8 – Vitesses des mesures sismique sur les différentes planches expérimentales

V_P	Ballast comp. Pl. 2 et 3	Ballast non comp. Pl. 2	Sable Pl. 4	Remarques
V_1 (m/s)	300±40	210±20	280	Variation faible de V_1 suivant l'épaisseur du ballast
V_2 (m/s)	750±250	400±100	1400	Variation élevée de V_2 suivant l'épaisseur du ballast

3.3 Résultats des mesures sismiques

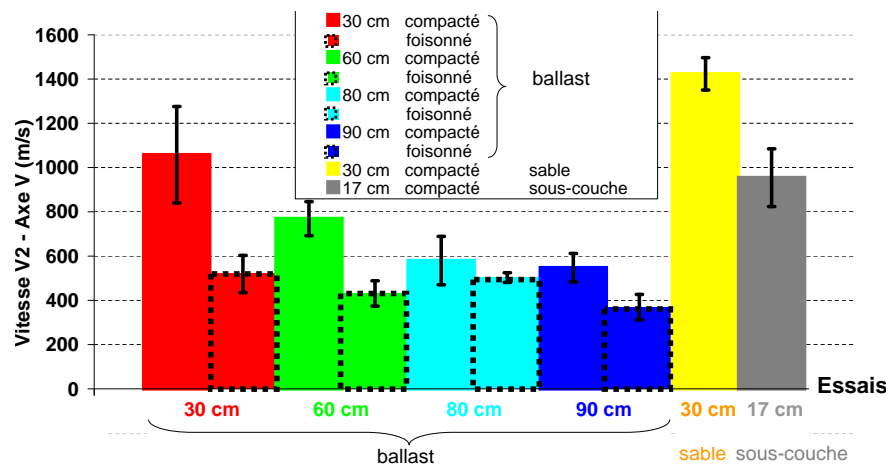


Figure 3.20 – Vitesse de propagation des ondes P réfractées dans le ballast (30, 60, 90 cm planche 2 et 80 cm planche 3), dans le sable (30 cm - planche 4), dans la sous-couche (17 cm -planche 3) - Marteau vertical

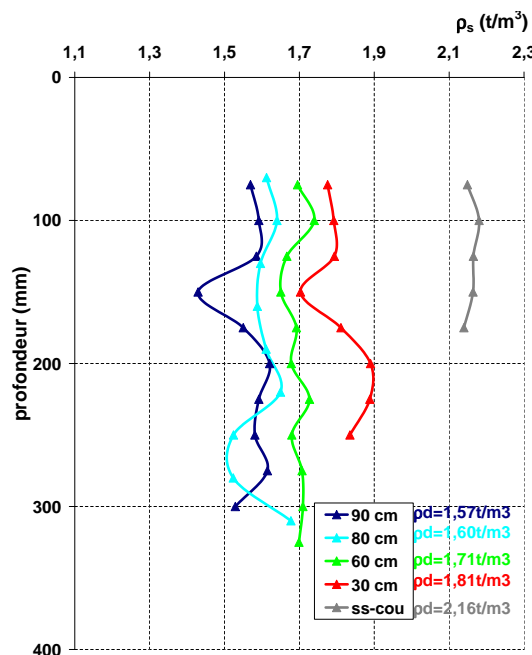


Figure 3.21 – Masse volumique mesurée à la GDS200

Les résultats du tableau 3.8 indiquent que les ondes directes "P" se propagent à une vitesse V_1 de 210 ± 20 m/s dans le ballast foisonné et de 300 ± 40 m/s dans le ballast compacté. Ce résultat est peu différent dans l'axe longitudinal et transversal du géophone (axe L et T). En regardant les résultats de vitesse V_1 obtenus pour les différentes épaisseurs de ballast de la planche 2 (30, 60 et 90 cm), il s'avère que la vitesse de propagation V_1 au sein du ballast varie d'environ 100 m/s en fonction de l'épaisseur de ballast (340 m/s à 30 cm,

230 m/s à 60 cm et 290 m/s à 90 cm). Ce constat peut être lié à un gradient de densité inhérent à la mise en œuvre (figure 3.21 et annexe B.14).

La vitesse des ondes réfractées V_2 varie beaucoup en fonction de l'épaisseur de ballast compacté. Nous passons en effet de 932 m/s à 443 m/s dans le cas compacté et de 463 à 292 m/s pour le cas foisonné pour des épaisseurs allant de 30 cm à 90 cm de ballast.

Avec une vitesse V_1 de 340 m/s pour une épaisseur de 30 cm, on se rapproche de la vitesse d'une onde sonore. Néanmoins, nous constatons que les résultats obtenus pour des épaisseurs plus conséquentes ainsi que dans le cas foisonné présentent une vitesse inférieure d'environ 150 m/s, ce qui permet d'infirmer l'hypothèse d'une onde sonore.

Suivant la théorie

Si les ondes se réfractent à l'interface ballast/sous-couche, la vitesse de l'onde réfractée (V_2) devrait être invariante quelle que soit l'épaisseur de ballast. Les résultats ne sont pas conformes à la théorie. En effet, ce n'est pas ce que l'on constate sur la figure 3.20.

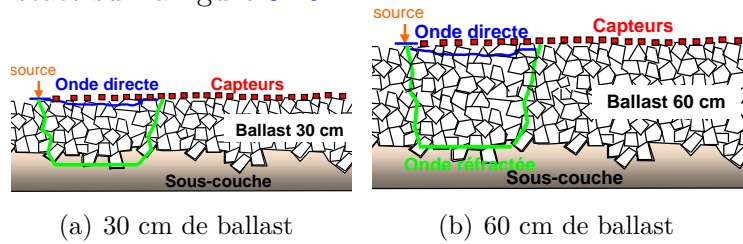


Figure 3.22 – Suivant théorie, réfraction interface ballast / sous-couche

Hypothèse

Les résultats semblent mettre en évidence une réfraction sur une interface à l'intérieur même du ballast. La variation de vitesse entre les différentes épaisseurs est moins marquée lorsque le ballast n'est pas compacté, ce qui confirme cette hypothèse d'interface dans le ballast. Les résultats de la planche 3 avec 80 cm de ballast (figure 3.19) confirment ces résultats avec une vitesse quasi proportionnelle à l'épaisseur de la couche de ballast ; ces différentes épaisseurs de ballast reflétant une variation de la masse volumique.

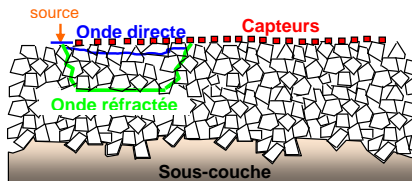
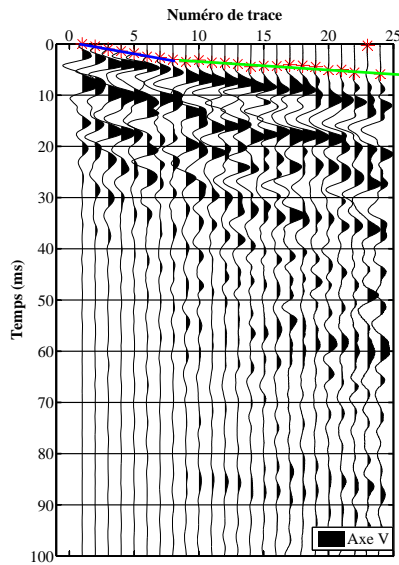


Figure 3.23 – Hypothèse, réfraction sur zone de compactage dans ballast

3.3 Résultats des mesures sismiques

Les résultats de la figure 3.21 montrent que la vitesse des ondes réfractées est proportionnelle à la masse volumique du ballast. Avec une masse volumique de $1,57 \text{ t/m}^3$, la vitesse V_2 est de l'ordre de 575 m/s alors qu'elle est de 785 m/s avec une masse volumique de $1,71 \text{ t/m}^3$. Les figures B.3 et B.5 présentent des photographies des planches 1, 2 et 3 utiles pour les essais sur ballast. La mise en œuvre des différentes épaisseurs de ballast semble ainsi jouer un rôle important sur les résultats de vitesse de l'onde réfractée. L'interface de réfraction ne se fait pas nécessairement entre les deux horizons mais plutôt aux interfaces des différentes couches de ballast mises en œuvre. Ainsi il est possible de faire un suivi de la compacité du ballast par la propagation des ondes sismiques en déterminant la vitesse des ondes réfractées V_2 .

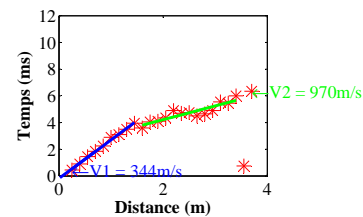
Quatre exemples d'essai avec des épaisseurs de ballast variable sont présentés sur les figures 3.24, 3.25, 3.26 et 3.27.



(a) Enregistrement sismique multi-traces



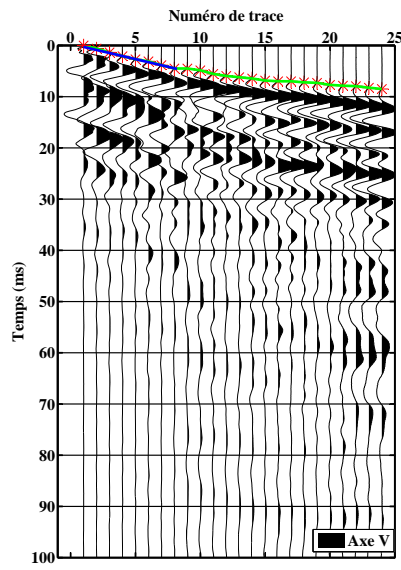
(b) Marteau Vertical



(c) Hodochrone

Figure 3.24 – Vitesse de propagation des ondes dans 30 cm de ballast - Planche 2 - Offset 25 cm

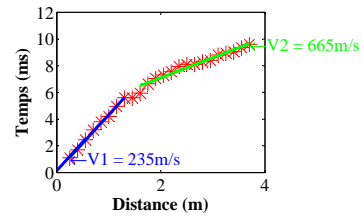
3 Expérimentations pour l'étude du ballast



(a) Enregistrement sismique multi-traces

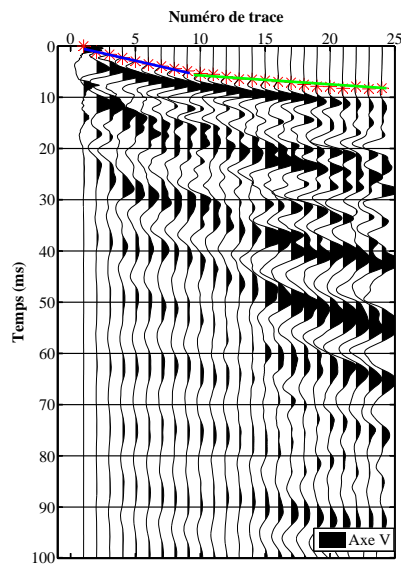


(b) Marteau Vertical



(c) Hodochrone

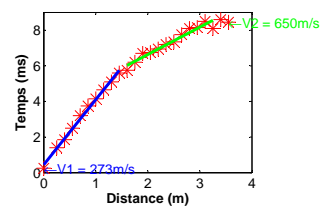
Figure 3.25 – Vitesse de propagation des ondes dans 60 cm de ballast - Planche 2
- Offset 25 cm



(a) Enregistrement sismique multi-traces



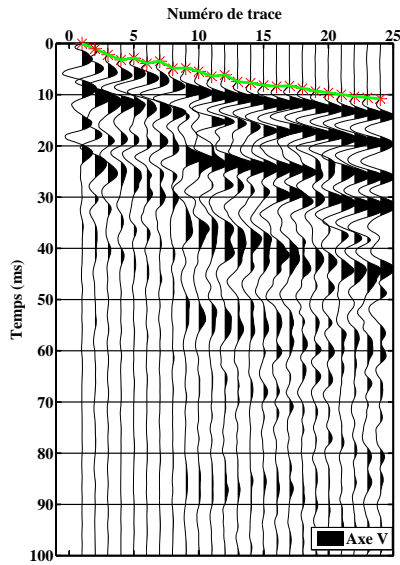
(b) Marteau Vertical



(c) Hodochrone

Figure 3.26 – Vitesse de propagation des ondes dans 80 cm de ballast - Planche 3
- Offset 25 cm

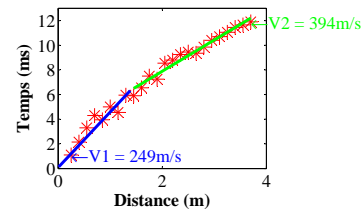
3.3 Résultats des mesures sismiques



(a) Enregistrement sismique multi-traces



(b) Marteau Vertical



(c) Hodochrone

Figure 3.27 – Vitesse de propagation des ondes dans 90 cm de ballast - Planche 2 - Offset 25 cm

3.3.3.2 Vitesse de propagation dans le sable

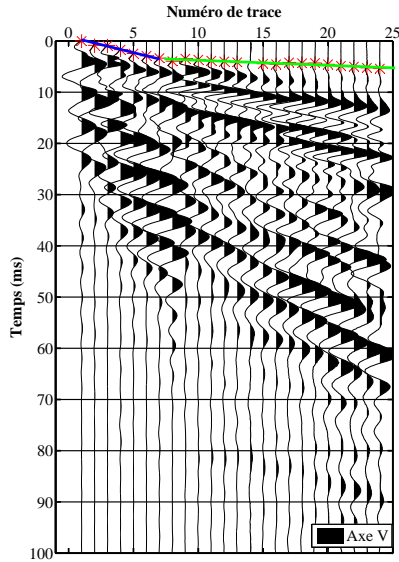
Un plot de sable limoneux B2, de 30 cm d'épaisseur, a été réalisé sur une structure similaire à celle avec le ballast afin de comparer les deux milieux. Le sable surmonte ainsi une épaisseur de 17 cm de GNT 0/31,5, 50 cm de GNT 0/31,5 et deux couches de 40 cm de sable B2.

Ce sable est un sable sec compacté à 98 % de l'OPN soit une masse volumique d'environ $1,7 \text{ t/m}^3$. Aucune mesure de masse volumique ni de teneur en eau n'a été faite sur ce sable. Dans la littérature on trouve des vitesses de propagation des ondes de compression pour un sable sec avec des valeurs variant de 400 à 1200 m/s pour une densité variant de $1,5$ à $1,7 \text{ t/m}^3$ (Mari et al. (1998), page 60). Par expérience, le sable mis en œuvre devrait atteindre pour le nombre de passes de compacteur une masse volumique équivalant à environ $1,7 \text{ t/m}^3$, ce qui devrait correspondre à une vitesse de compression de l'onde directe de 1200 m/s (voir ci-dessus) alors que dans notre cas nous atteignons une valeur V_1 de 280 m/s (figure 3.19). L'état hydrique est un paramètre qui influence fortement la vitesse de propagation des ondes et pourrait être une hypothèse pour ces faibles vitesses. Il est à noter que la teneur en eau du sable B2 de la planche 2 varie à la mise en œuvre de 5,3 à 8,17 %, soit un état sec par rapport aux références Proctor.

Le sable de la planche 4 et la GNT, qui étaient en place depuis plusieurs mois, doivent nécessairement atteindre un état très sec car la structure est

construite dans une fosse sous hangar à l'abri des pluies.

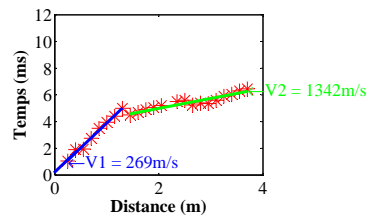
Un exemple d'essai est présenté sur la figure 3.28.



(a) Enregistrement sismique multi-traces



(b) Marteau Vertical



(c) Hodochrone

Figure 3.28 – Vitesse de propagation des ondes dans 30 cm de sable - Planche 4 - Offset 25 cm

3.3.3.3 Vitesse des ondes dans la sous-couche en GNT

La vitesse apparente de la GNT sous-jacente au sable (planche 4) est très grande avec une vitesse réfractée V_2 de 1423 m/s. Pour la GNT sous-jacente au ballast (planche 2 et 3), la vitesse V_2 varie suivant l'épaisseur de ballast de 400 à 1200 m/s. Pour comprendre les résultats de vitesses V_2 sur les différentes planches 1, 2, 3 et 4, des mesures sont réalisées directement sur la GNT de la planche 3.

Étant donné la faible épaisseur de la sous-couche ferroviaire (17 cm de GNT), les géophones de la flûte sismique ont été espacés de 7,5 cm en complément des essais avec un écartement entre géophones de 15 cm afin de mieux discriminer la célérité de cette couche. Les essais ont été réalisés sur une sous-couche ferroviaire provenant de la carrière de Chailloué mise en œuvre depuis plusieurs mois. Les matériaux de cette structure ont séché depuis la mise en œuvre. Ce phénomène, en plus d'un objectif de compactage très élevé (q_1), ne permet pas d'enfoncer les géophones à la main dans la sous-couche en GNT. Dans ce contexte, il a été nécessaire de forer un trou de faible diamètre (ϕ 8 mm) que l'on a ensuite rempli de plâtre liquide afin d'insérer la tige du géophone pour ainsi garantir un bon contact entre le sol et le capteur (figure 3.29). La flûte sismique a été positionnée à une distance minimale de 1 m par

3.3 Résultats des mesures sismiques

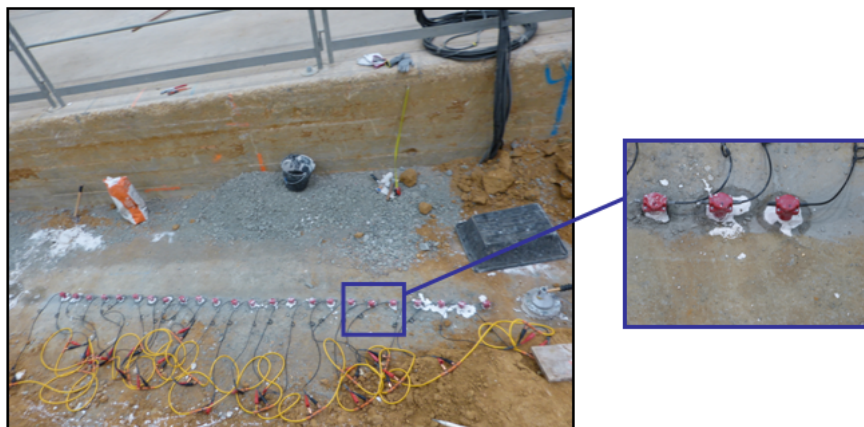


Figure 3.29 – Dispositif sismique de la sous-couche ferroviaire - planche 3

rapport aux bords de la fosse en béton et du remblai en ballast 80 cm pour éviter les réflexions parasites.

La vitesse dans la sous-couche était attendue dans une gamme comprise entre 1000 et 1400 m/s. Ces valeurs correspondent à la vitesse de réfraction de la planche 2 avec 30 cm de ballast et de la planche 4 avec 30 cm de sable.

Tableau 3.9 – Résultats des vitesses sismiques sur la GNT - planche 3

PLANCHE 3 - GNT		
Vitesse	d=7,5 cm	d=15 cm
V_1 (m/s)	525 \pm 30	630 \pm 43

La vitesse V_1 de l'onde directe dans la sous-couche en GNT atteint une valeur de 525 m/s avec un espacement de 7,5 cm entre géophones et de 630 m/s avec un espacement de 15 cm. La valeur de la vitesse réfractée V_2 de la planche 3 avec 80 cm de ballast (figure 3.19) se rapproche fortement de la vitesse mesurée sur la GNT (tableau 3.9). Les valeurs de vitesse V_2 des planches 2 ne reflètent pas la valeur de la vitesse de la GNT.

Il faut noter que les ondes présentent une anomalie sur les graphes de cette couche et que cette valeur peut être erronée (figure 3.30). Ce résultat peut être lié aux conditions de mise en œuvre des géophones dans la sous-couche ferroviaire (perçage, plâtre liquide).

A partir de ces essais sismiques sur la sous-couche, nous ne pouvons pas conclure sur la vitesse de propagation dans la GNT. Les valeurs de vitesse V_2 obtenues sur les différentes planches à partir des résultats de la sismique réfraction (variables de 400 à 1200 m/s) sont le reflet d'interfaces de compactage au sein du ballast.

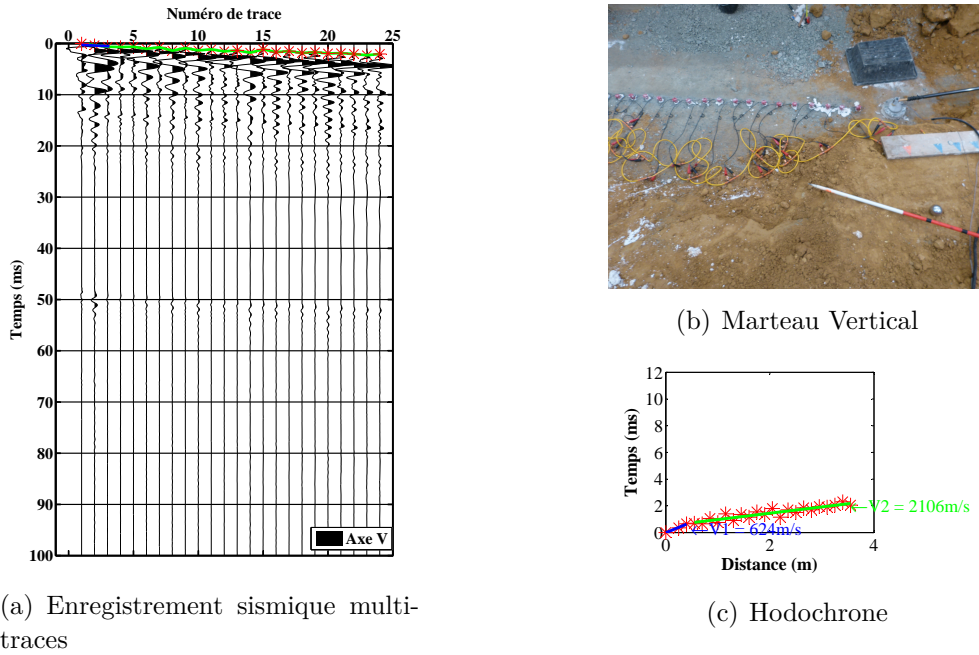


Figure 3.30 – Vitesse de propagation des ondes dans 17 cm de sous-couche ferroviaire en GNT - Planche 3 - Offset 25 cm

3.3.4 Épaisseur des couches - compacité

À partir des vitesses de propagation obtenues suite aux essais de sismique réfraction, par régression linéaire de l'inverse des pentes des droites et en faisant comme hypothèse que les ondes sismiques dans le ballast se propagent selon les lois de Descartes, il est possible de calculer la valeur théorique des épaisseurs de couches.

Ces calculs sont faits pour les deux états de serrage de ballast avec un offset de 25 cm. Pour chaque épaisseur de ballast (30, 60, 80 et 90 cm), un enregistrement (figures 3.24, 3.25, 3.26 et 3.27) a permis de faire le calcul de ces épaisseurs. L'ordonnée à l'origine ou intercept I et la distance critique X_c sont déterminées pour chaque cas en extrapolant graphiquement les pentes (figures 2.4 page 39, 3.18 page 75 et 3.31 page 85 ; tableaux 3.10 et 3.11).

On prend une longueur de dispositif égale à deux fois cette distance critique X_c (Magnin & Bertrand (2005), page 20). Le dispositif faisant 3,45 m et les valeurs de X_c pour les essais étant inférieures ou égales à 1,6 m, nous vérifions que le dispositif est suffisamment long afin de visualiser les différentes réfractions concernant notre étude.

La relation permettant de calculer l'épaisseur e des couches à partir de l'intercept I , de la vitesse V_1 et de l'angle de réfraction i_1 est définie ci-après :

$$e = \frac{IV_1}{2\cos i_1} \quad (3.5)$$

Les tableaux synthétiques 3.10 et 3.11 présentent les épaisseurs calculées

3.3 Résultats des mesures sismiques

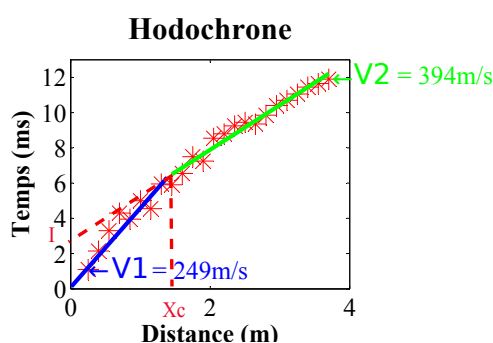


Figure 3.31 – Exemple d'hodochrone pour le calcul de l'intercept et de la distance critique

à partir des hodochrones.

Tableau 3.10 – Épaisseurs calculées et mesurées - matériaux compactés

COMPACTE										
Matériau	Ép. obj. (cm)	Offset (cm)	Nº essai	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	i_1 (°)	X_c (m)	I (ms)	$e_{calculée}$ (cm)	e_{MEO} (cm)
GNT	17	25	1200	541	1053	30	0,4	0,43	132 ⁸	17
Sable	30	55	912	258	1484	10	1,45	4,9	64	30 ⁹
Ballast	30	25	31	330	932	21	1,1	2,4	42	29
	60	25	402	244	723	20	1,5	4,4	57	69
	80	25	10-4	260	657	23	1,3	5,2	73	80
	90	25	1106	248	443	34	1,6	3,2	48	102

Tableau 3.11 – Épaisseurs calculées et mesurées - matériaux foisonnés

FOISONNE										
Matériau	Ép. obj. (cm)	Offset (cm)	Nº essai	V_1 (m/s)	V_2 (m/s)	i_1 (°)	X_c (m)	I (ms)	$e_{calculée}$ (cm)	e_{MEO} (cm)
Ballast	30	25	210	219	463	28	0,77	2,1	27	33
	60	25	223	208	390	32	1,6	4	49	66
	80	25	71	247	391	39	1,75	2,5	40	80
	90	25	1919	185	292	39	1,45	3,2	38	95

Les résultats du calcul des épaisseurs sont différents des épaisseurs mesurées à la mise en œuvre avec une erreur variant de 8 à 60 % dans les deux cas de

- 8. épaisseur calculée reflétant les valeurs erronées mesurées sur la sous-couche
- 9. valeur estimée

3 Expérimentations pour l'étude du ballast

compactage avec une différence plus marquée dans les épaisseurs importantes de ballast (figure 3.32).

Dans le cas foisonné, les éléments de ballast étant peu jointifs, nous notons une difficulté pour réaliser les pointés à des distances correspondant à l'arrivée de l'onde réfractée car le ballast foisonné amortit beaucoup l'onde. Le signal se trouve ainsi dans le bruit de fond ambiant.

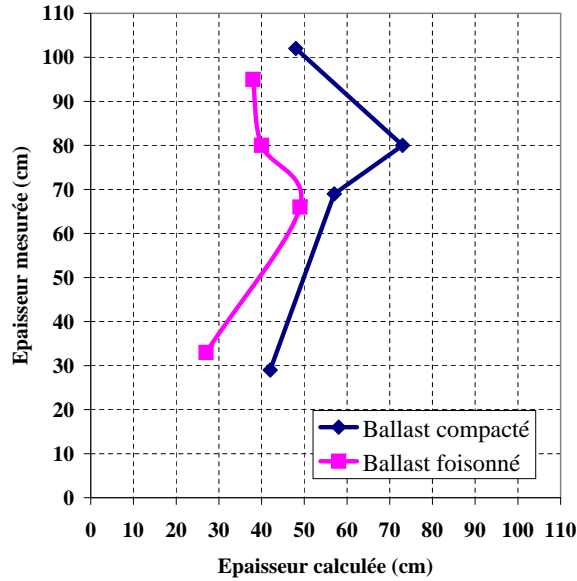


Figure 3.32 – Comparaison des épaisseurs calculées suivant les lois de Snell-Descartes et des épaisseurs mises en œuvre

Les résultats des courbes sismiques mettant en évidence les paramètres "épaisseur des couches de ballast" et "compacité" figurent en annexe B.4.

En conclusion, la sismique permet de quantifier une erreur de 8 à 60 % entre les épaisseurs calculées et mesurées. Elle montre que la propagation des ondes dans le ballast est soumise à des phénomènes complexes et n'obéit pas simplement aux lois de Snell-Descartes. Il convient de corréler les résultats de la sismique avec ceux du radar pour vérifier si l'épaisseur de mise en œuvre des différentes couches de ballast est visible par les ondes électromagnétiques.

Néanmoins cette analyse reflète uniquement une mesure pour chaque épaisseur de ballast. Il conviendrait de poursuivre et faire une analyse plus poussée afin d'obtenir un écart-type sur la mesure.

Il serait intéressant de compléter ces résultats en regardant l'effet de l'augmentation de l'épaisseur du ballast sur la réponse de la sous-couche comme cela peut être fait dans une approche radar.

3.3 Résultats des mesures sismiques

3.3.5 Amortissement des ondes

L'amortissement des ondes de cette étude est déterminé sur l'ensemble du signal en prenant en compte toutes les ondes composant un signal sismique. Les vitesses sont enregistrées à la surface du ballast au moyen de géophones disposés sur une flûte sismique avec un écartement défini, d , de 15 cm (figure 3.33).

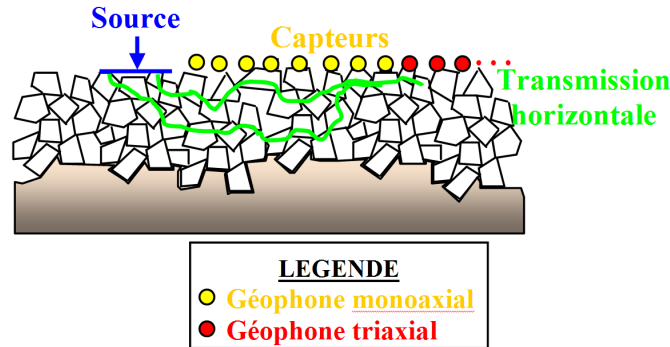


Figure 3.33 – Schéma de la mesure de l'amortissement des ondes

La théorie de l'amortissement des ondes est décrite dans le paragraphe 2.4 à la page 53.

3.3.5.1 Amortissement à la surface du ballast

Pour des questions pratiques (accéléromètres moins encombrants que les géophones), nous avons en premier lieu caractérisé la source au moyen d'accéléromètres. Ces derniers sont fixés :

- à l'intérieur d'une double galette creuse pour le marteau vertical et la chute de masse,
- sur une platine vissée sur un bastaing en bois dans le cas de la sollicitation horizontale,
- sur le berceau en acier du vibreur pneumatique,
- et sur le pied du vibreur inertiel (figure 3.4 à la page 61).

Suite à des problèmes de recalage de l'arrivée de l'onde après intégration des mesures accélérométriques (déphasage du signal), la normalisation des géophones de la planche 2 a été faite par rapport au premier géophone de la flûte sismique et non par rapport à la source suite à des problèmes à la source. Aussi, afin de vérifier si le signal se réfracte ou non entre la source et ce premier géophone et ainsi voir si l'on a une seule droite entre les deux, nous avons réalisé la planche 3 - 80 cm de ballast en instrumentant la source de ces essais avec un géophone monoaxial vertical.

Les courbes de la figure 3.34 sont obtenues en moyennant 3 essais pour un offset à la source de 25 cm. L'énergie (intensité d'Arias, équation 2.28 à

la page 55) de chaque géophone est enregistrée sur toute la durée de l'enregistrement ($t = 252,1$ ms) et normalisée par rapport à l'énergie du premier géophone. Dans le cas où le matériau aurait un comportement linéaire, la droite d'amortissement devrait être identique pour toutes les sources après normalisation. Ce matériau ne présente ainsi pas un comportement linéaire. Cette conclusion sera confirmée à l'issue d'essais et de traitements complémentaires.

Les graphes de la figure 3.34 indiquent que la pente de décroissance d'amplitude du ballast est bien plus importante que dans le sable. En comparant l'état de serrage du ballast, dans la majeure partie des cas (60 et 90 cm de ballast), le ballast foisonné amortit plus que le ballast compacté mettant ainsi en évidence l'effet du vide entre les granulats de ballast non compacté sur la propagation des ondes.

Seule la configuration avec 30 cm de ballast conduit à une décroissance plus importante sur le plot foisonné par rapport au plot compacté. La difficulté d'instrumenter le ballast interviendrait-elle à ce niveau ? Il faut noter la plus faible différence entre les deux plots pour une épaisseur de 90 cm ; ce constat est fortement lié au fait que la dernière couche de ballast n'a pas atteint l'objectif de compactage visé sur le plot compacté. Pour une épaisseur de 60 cm, la pente du ballast foisonné se rapproche de celle du sable et les écarts-types sont plus conséquents.

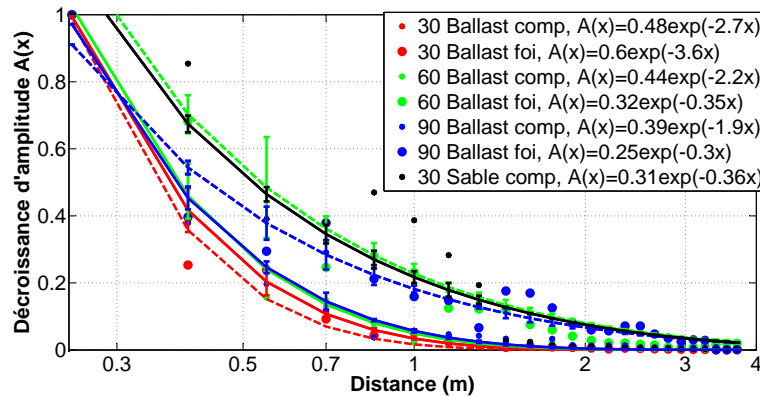


Figure 3.34 – Décroissance d'amplitude des ondes dans le ballast et le sable - Marteau vertical (plot foisonné en pointillé et plot compacté en trait plein)

3.3.5.2 Amortissement dans l'épaisseur du ballast

Suite à la difficulté de positionner un capteur à un endroit donné dans le ballast (éléments grossiers pouvant bouger pendant le compactage et référen-

3.3 Résultats des mesures sismiques

cement d'un capteur par rapport à l'autre et non implantation des points par rapport au même capteur de la sous-couche), les capteurs ne se trouvent pas à l'aplomb de la sollicitation à l'offset 25 cm mais décalés de $\pm 5,25$ cm en X et $\pm 3,25$ cm en Y pour le plot compacté et de $\pm 6,25$ cm en X et de $\pm 0,75$ cm en Y pour le plot foisonné (figure 3.35).

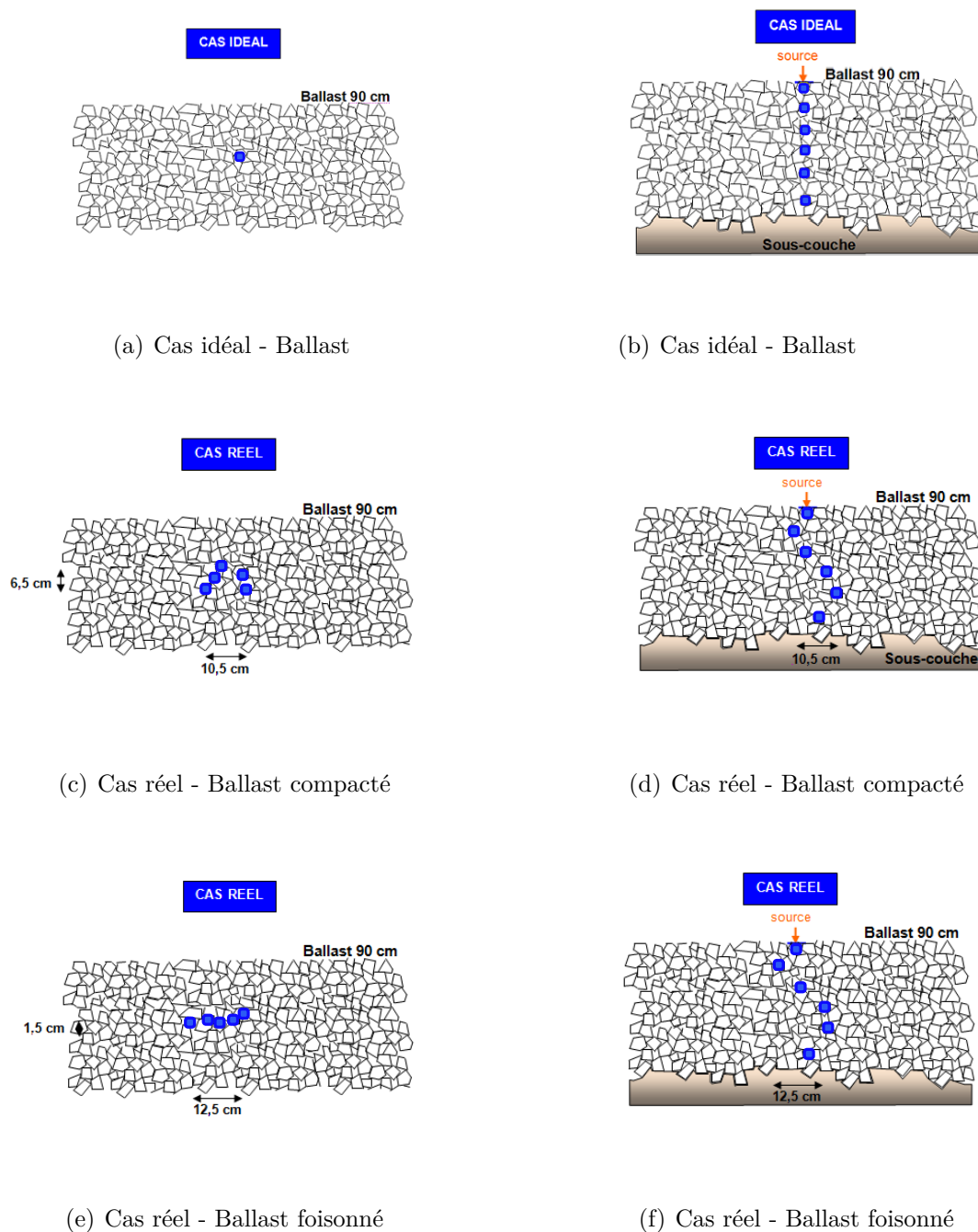


Figure 3.35 – Schéma de l'implantation des capteurs dans 90 cm de ballast (vues de dessus à gauche et vues en élévation à droite)

3 Expérimentations pour l'étude du ballast

Ainsi les résultats sont difficilement exploitables (figure 3.36).

En théorie, le ballast foisonné devrait plus amortir par rapport au ballast compacté dans l'épaisseur de la couche, ce qui ne semble pas être le cas.

Néanmoins, ce constat peut provenir de l'une des hypothèses suivantes :

- phénomènes complexes liés à un milieu discret conduisant à des résultats inattendus sur l'amortissement entre le plot foisonné et le plot compacté comme nous avons pu le quantifier en surface (paragraphe 3.3.5.1),
- problème de placement des capteurs dans le ballast et de la source à l'aplomb des capteurs (figure 3.35),
- impossibilité de reproduire les essais entre les différentes épaisseurs de ballast. Les résultats sur 60 cm et 90 cm de ballast avec un offset de 25 cm ne donnent pas le même résultat (figure 3.36). Les chemins préférentiels dans un cas sont différents entre les deux modalités avec le changement des éléments de ballast superficiels, et par là même le changement des contacts entre grains,
- compactage du plot foisonné suite aux différents impacts successifs effectués sur les différentes planches. L'amortissement dans le ballast foisonné évolue en effet avec les essais. Les essais normalisés avec le marteau présentent une réponse plus amortie que les essais avec la chute de masse alors que le seul paramètre influent est le changement de source ce qui peut montrer la non linéarité de ce milieu ou le compactage du ballast foisonné.

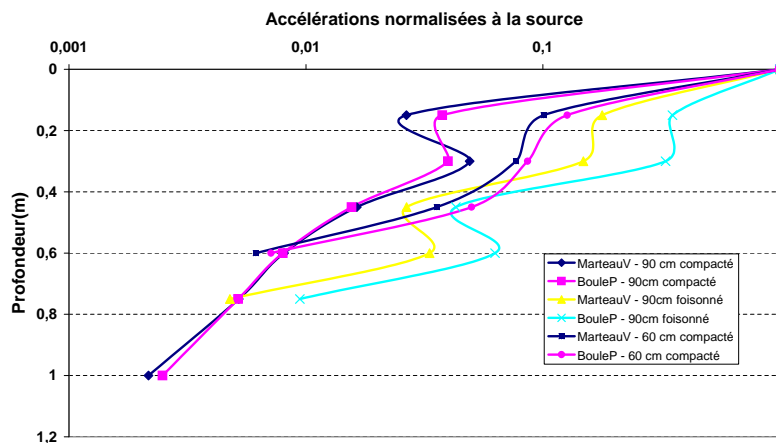


Figure 3.36 – Accélérations normalisées à la source dans 60 et 90 cm de ballast - Marteau vertical - Offset 25 cm - Axe V

3.3 Résultats des mesures sismiques

3.3.5.3 Amortissement à travers le ballast en instrumentant la sous-couche

Des essais ont été réalisés par Rosenthal ⁽¹⁰⁾ permettant de mesurer la distribution des pressions reprises par le ballast avec la mesure de la pression sous le ballast atteignant une valeur réelle de 40 kN/m^2 suite au passage d'un train ICE à la vitesse de 160 km/h . Cette étude montre des différences significatives entre les traverses. Si l'on fixe une pression de chargement sur le ballast de 100 %, on retrouve sous le ballast une pression de 80 % à l'aplomb de la traverse principale, 50 % sur les traverses latérales et de 65 % entre les traverses.

Les résultats obtenus pour le marteau vertical et la chute de masse sont cohérents pour un placement de la source sur le ballast à l'aplomb de l'accéléromètre central du réseau de capteurs de la sous-couche matérialisé par la position fictive des traverses (figure 3.11 à la page 66). La comparaison des résultats normalisés à la source montre que le matériau n'a pas un comportement linéaire, c'est-à-dire que le module du matériau varie en fonction de l'état de contrainte. Dans le cas d'un matériau avec un comportement linéaire, nous aurions dû avoir les mêmes valeurs d'accélération normalisée avec le marteau vertical générant à la source une accélération en moyenne de 120 g et la chute de masse avec une accélération moyenne de 90 g, ce qui n'est pas le cas (figures 3.37 et 3.38).

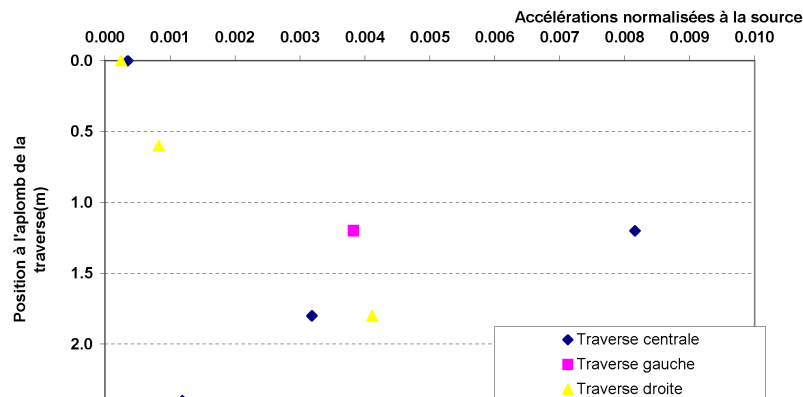


Figure 3.37 – Accélérations normalisées à la source mesurées dans la sous-couche - Marteau vertical - planche 2

L'accélération enregistrée entre le ballast et la sous-couche présente un amortissement à l'aplomb de la sollicitation de 92 % avec le marteau V et de 96 % avec la chute de masse. Latéralement sur les capteurs implantés au centre fictif de traverses adjacentes en comparant avec la valeur de l'accéléromètre dans la sous-couche à l'aplomb de la traverse fictive, l'amortissement

10. http://www.imb-dynamik.de/pdf/publ/How_the_ballast_carries_its_load.pdf

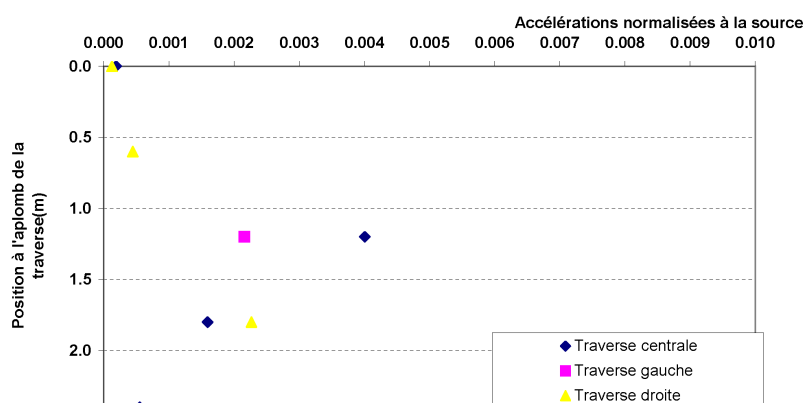


Figure 3.38 – Accélérations normalisées à la source mesurées dans la sous-couche - chute de masse - planche 2

est encore de 50 %. La comparaison des résultats entre la traverse centrale et les traverses adjacentes indique que, pour une sollicitation au centre de la traverse centrale, l'amortissement est de 50 % dans la sous-couche sur les traverses adjacentes au centre de ces dernières (comparaison des points bleus et roses positionnés à 1,15 m, figures 3.37 et 3.38). La dispersion des ondes que l'on observe sur les autres points des traverses adjacentes ne reflète pas une décroissance géométrique comme dans un milieu continu. Les chaînons de force préférentiels sont à ce niveau très influents sur la réponse sismique au sein de la sous-couche. On note en effet des valeurs plus conséquentes sur la traverse droite qui est plus éloignée de la source par rapport à la traverse centrale (comparaison des points positionnés à 1,72 m et des points symétriques par rapport à la source à 0,57 et 1,72 m).

3.3.5.4 Amortissement fréquentiel

Étude de la configuration optimale de la pose des géophones (posés ou scellés) Le traitement dans le domaine de Fourier des enregistrements sismiques permet d'étudier l'amplitude des spectres fréquentiels des géophones en fonction de la distance à la source (figure 3.39).

En comparant deux modalités de fixation de géophones (figure 3.39), nous constatons que la bande passante en fréquence est plus basse fréquence lorsque les géophones sont posés. Elle va de 100 à 400 Hz dans le cas de géophones posés et de 100 à 1000 Hz pour le cas scellé. Le mauvais contact entre le capteur et le ballast joue un rôle de filtre passe bas et affecte le contenu spectral des géophones posés. Les spectres des capteurs posés (figure 3.39) montrent que les géophones répondent suivant les contacts entre les granulats de ballast. Ces chemins préférentiels appelés dans la littérature "chemins de force" influencent la réponse des capteurs. Ce phénomène est accentué par le fait d'instrumenter

3.3 Résultats des mesures sismiques

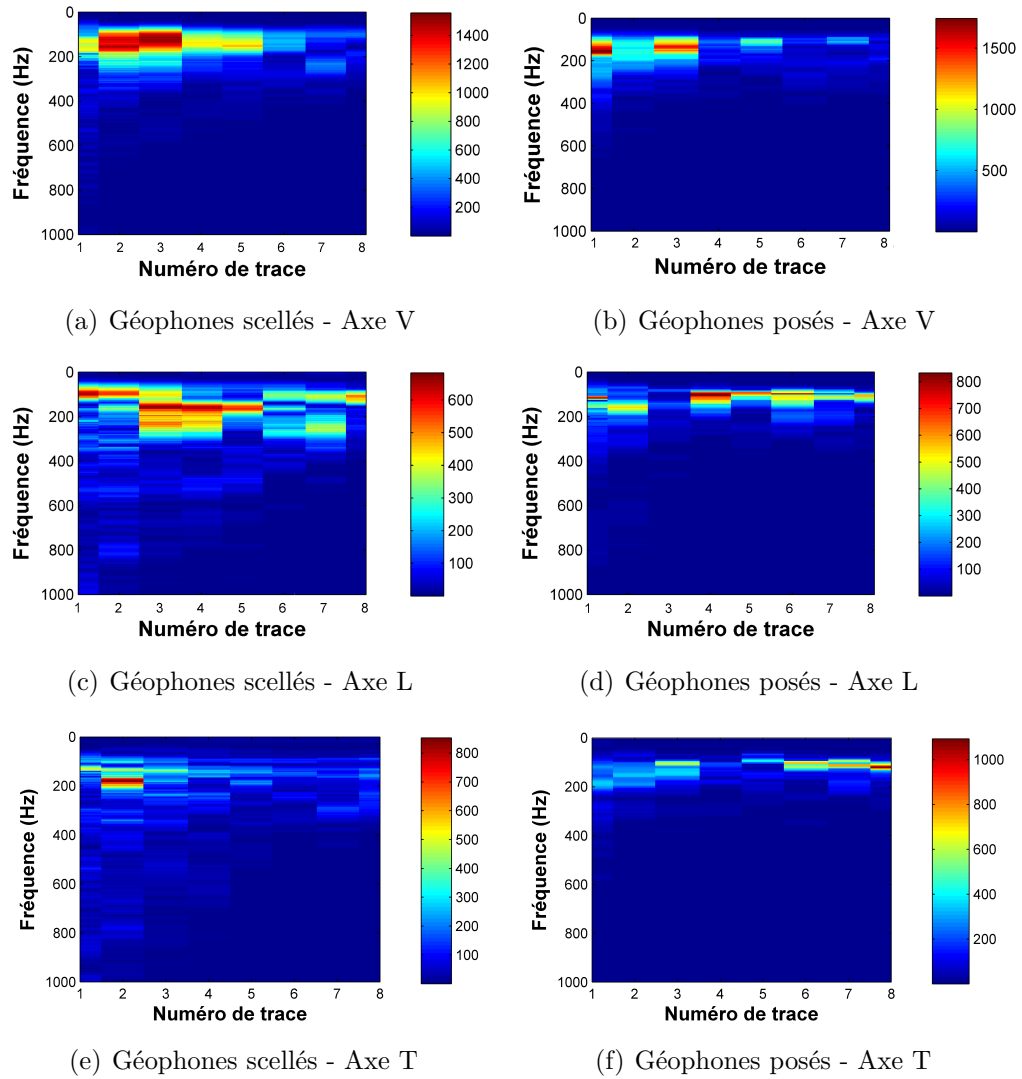


Figure 3.39 – Comparaison des spectres de vitesse avec deux modes de fixation de géophones (posés et scellés) Planche 1 - Marteau V - Offset de 25 cm

le ballast à sa surface car les éléments ne sont pas confinés.

En regardant les trois spectres d'une même modalité de pose (Axes V, L, T de la figure 3.39), les graphes montrent que certains capteurs sont sollicités majoritairement dans l'axe vertical tandis que pour d'autres, les axes longitudinal et transversal sont prépondérants. Ce résultat montre le côté aléatoire d'un milieu discret lié aux chaînons de force. Dans ce contexte, normer les 3 axes de propagation (spectre VLT normé = $\sqrt{V^2 + L^2 + T^2}$) améliore la compréhension des phénomènes. Le graphe 3.40 présente un exemple de résultat de signal normé à partir des 3 axes. Ce traitement améliore sensiblement les résultats mais n'est pas suffisant pour refléter un comportement aisément exploitable similaire à un milieu continu, le géophone 2 répondant moins que le 3.

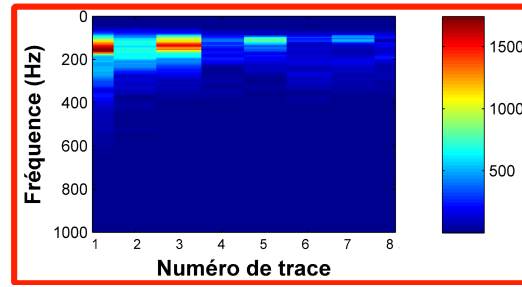


Figure 3.40 – Exemple de spectre normé avec les trois axes VLT - Marteau V - Offset de 25 cm - géophones posés

Ainsi il est préférable de sceller les capteurs au plâtre avec plusieurs éléments de ballast. Le scellement des géophones moyenne en effet l'effet de la transmission du signal et permet aux capteurs de rencontrer systématiquement les ondes.

Le scellement perturbe très localement le milieu et conduit à :

- obtenir un spectre plus énergétique autour de la fréquence prépondérante,
- moyenner la transmission dans un milieu discret, ce qui permet ainsi de tester des méthodes adaptées aux milieux continus.

La figure 3.41 reflète ainsi un résultat moins aléatoire que l'exemple de la figure 3.40 avec des géophones posés. On voit néanmoins que l'énergie du spectre est soumise à la distribution des chaînons de force. Nous visualisons une décroissance par rapport à la distance qui n'est pas régulière comme dans les milieux continus (comparaison trace n°1 et 2).

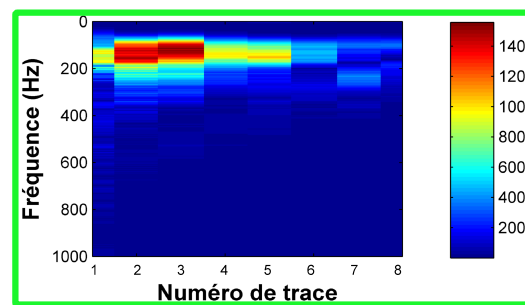


Figure 3.41 – Exemple de spectre normé avec les trois axes VLT - Marteau V - Offset de 25 cm - géophones scellés

Rôle du ballast sur l'atténuation fréquentielle Le traitement fréquentiel, réalisé sous Matlab, a pour objectif d'étudier le rôle du ballast sur l'atténuation des fréquences en fonction de la distance. La transformée de Fourier des enregistrements sismiques conduit à un spectre de Fourier en fonction de

3.3 Résultats des mesures sismiques

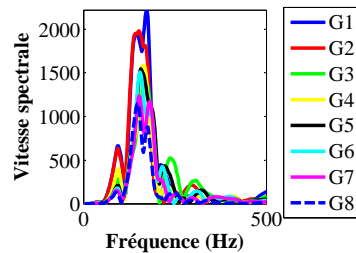
chaque trace et donc en fonction de la distance, permettant ainsi de visualiser l'effet de filtre fréquentiel du ballast en fonction de la distance.

La fréquence dominante est comprise entre 100 et 250 Hz pour les différentes sources (figures 3.44). Pour quantifier l'atténuation de cette fréquence par le milieu, nous avons déterminé la distance à la moitié de la valeur maximale de l'énergie du spectre fréquentiel. Suivant la source, cette énergie peut s'amortir de 50 % entre 0,4 et 1,15 m pour le ballast et entre 1,15 et 1,5m pour le sable (exemple de spectre sur le sable sur la figure 3.42).

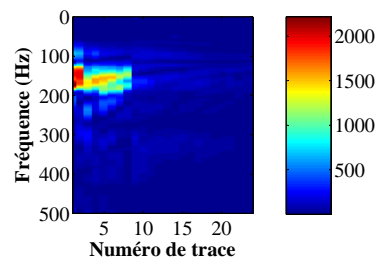
En comparant les spectres de vitesses des différentes épaisseurs de ballast de la planche 2, l'épaisseur de ballast n'influencerait a priori pas l'atténuation fréquentielle à la différence de l'état de serrage du ballast qui joue un rôle important, on pouvait s'y attendre du fait de l'augmentation du pourcentage de vide dans le cas de ballast foisonné.

Le plot en sable atténue moins la fréquence prépondérante du signal. L'énergie du spectre est en effet deux fois plus importante sur le sable que sur le ballast (figures 3.42 (b) et 3.43 (b) (d) (f)). Ce phénomène était attendu par rapport aux caractéristiques même du ballast, qui présente un pourcentage important de vides.

De plus, les spectres de vitesse normalisés (figure 3.44) permettent de visualiser la présence d'ondes dispersives. En effet, nous observons que l'amplitude varie en fonction de la fréquence et de la distance, ce qui reflète une dispersion des ondes. Sans dispersion la fréquence prépondérante devrait avoir la même vitesse, ce qui n'est pas le cas.



(a) Spectre de vitesse de 8 des 24 géophones



(b) Vue de dessus du spectre de vitesse

Figure 3.42 – Comparaison des spectres de vitesse du Marteau V - Planche 4 - 30 cm de sable - Offset de 55 cm

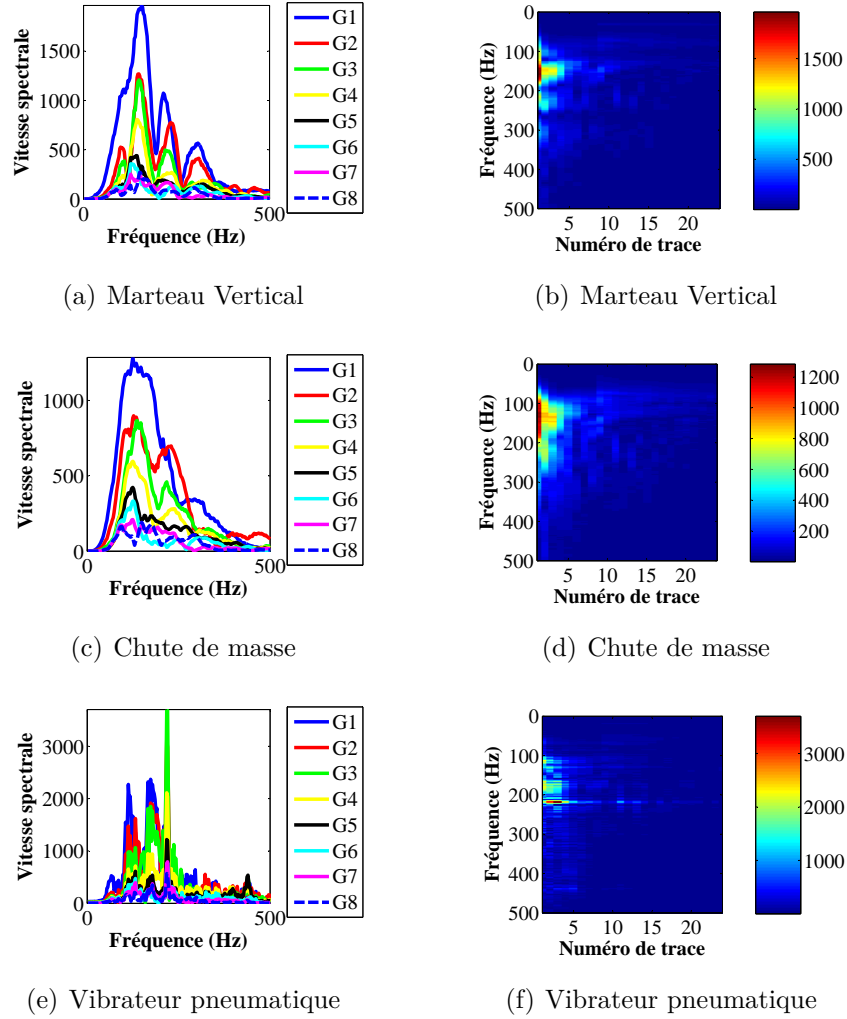


Figure 3.43 – Comparaison des spectres de vitesse des différentes sources - Planche 2 - 30 cm de ballast - Offset de 25 cm - Spectre de vitesse de 8 des 24 géophones (à gauche) - Vue de dessus du spectre de vitesse (à droite)

3.3 Résultats des mesures sismiques

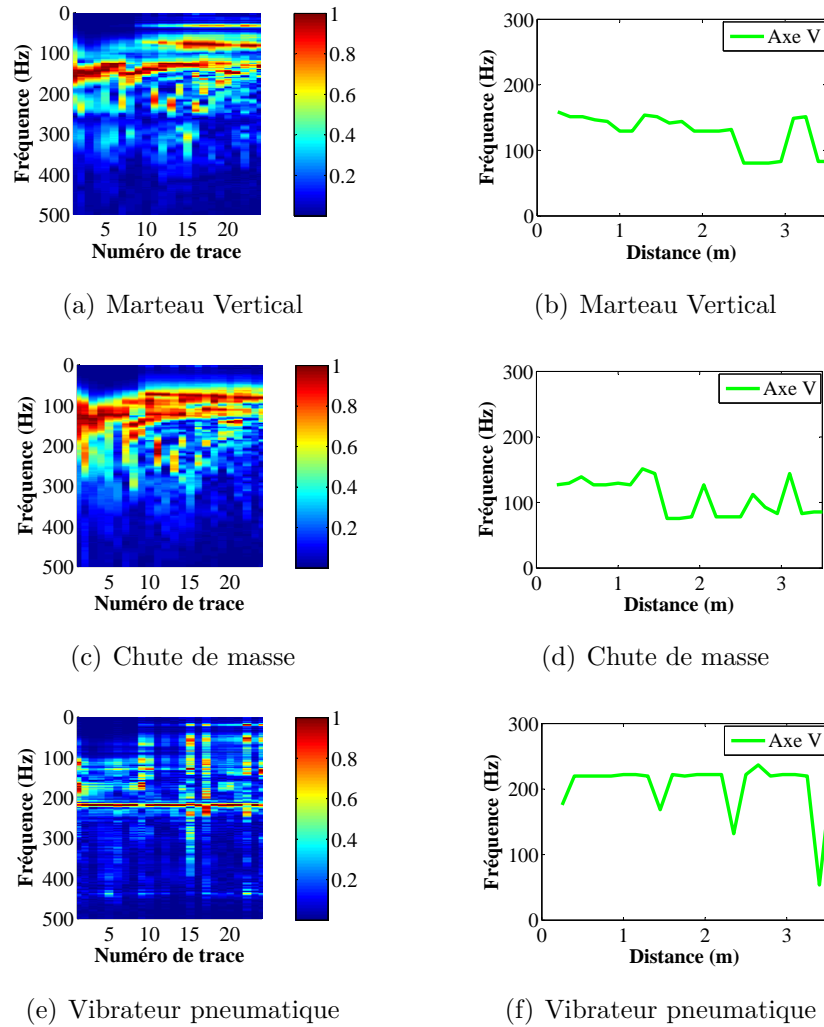


Figure 3.44 – Comparaison de différentes sources - Planche 2 - 30 cm de ballast - Offset de 25 cm - Spectre de vitesse normalisée (à gauche) - Fréquences maximales (à droite)

Deux tableaux synthétiques présentent la fréquence prépondérante pour chaque source ainsi que la distance à la source à la moitié de l'énergie spectrale. Le tableau 3.12 concerne la comparaison des énergies à cette distance pour 30 cm de ballast compacté et foisonné avec un offset de 25 cm.

Les résultats montrent que le ballast foisonné atténue plus rapidement l'énergie de la fréquence prépondérante aux environs des deux tiers de la distance sur du ballast compacté. L'énergie du spectre des vibrateurs est dix fois plus conséquente que celle des sources impulsionnelles, ce qui est dû au mode entretenu de ce type de source.

Le tableau 3.13 permet de comparer le ballast et le sable avec un offset de 55 cm. Ainsi, nous visualisons que le sable présente un amortissement fréquentiel 30 % moins élevé.

3 Expérimentations pour l'étude du ballast

Tableau 3.12 – Distance à partir de laquelle l'énergie $E = \frac{1}{2}E(f_p)$ avec f_p la fréquence prépondérante - Ballast compacté et foisonné - Offset de 25 cm

Matériau		Ballast compacté			Ballast foisonné		
Offset (cm)		25			25		
Source	Planche / Épaisseur	$E(f_p)$	f_p (Hz)	Distance pour $\frac{1}{2}E(f_p)$ (m)	$E(f_p)$	f_p (Hz)	Distance pour $\frac{1}{2}E(f_p)$ (m)
MarteauV	Planche2/30	2200	150	0,85	3000	150	0,7
BouleP	Planche2/30	1250	120	0,85	2200	120	0,55
MarteauH	Planche2/30	1200	100	1,15	-	-	-
VibrateurP	Planche2/30	15000	200	0,55	15000	240	0,4
VibrateurI	Planche2/90	14000	150-100	0,7	16000	120-150	0,55

Tableau 3.13 – Distance à partir de laquelle l'énergie $E = \frac{1}{2}Ef_p$ (avec f_p la fréquence prépondérante) - Ballast et sable compactés - Offset de 55 cm

Matériau		Ballast compacté			Sable compacté		
Offset (cm)		55			55		
Source	Planche / épaisseur	$E(f_p)$	f_p (Hz)	Distance pour $\frac{1}{2}E(f_p)$ (m)	$E(f_p)$	f_p (Hz)	Distance pour $\frac{1}{2}E(f_p)$ (m)
MarteauV	Planche2/30	1100	150-80	1	2200	150	1,3
BouleP	Planche2/30	700	100	1	2000	150-100	1,3
MarteauH	Planche2/30	520	120	0,7	-	-	-
VibrateurP(*)	Planche2/30	15000	220	0,7	-	-	-
VibrateurI	Planche2/90	14000	150-100	0,7	19000	200-50	0,85
(*) spectre avec plus d'énergie autour de f_p							

3.3.6 Ondes de surface - courbe de dispersion

Les mesures sismiques réalisées sur les différentes planches expérimentales ont été traitées pour obtenir les courbes de dispersion dans le ballast.

Le choix du dispositif d'onde de surface est décrit dans le paragraphe 3.2.

Afin d'appréhender au mieux l'étude de la dispersion, il est intéressant :

- d'étudier les courbes de dispersion théoriques avec le modèle développé par l'ISTerre de Grenoble, France, [Wathelet \(2005\)](#) sous Geopsy intitulé "gpdc",
- et de déterminer les limites expérimentales en fonction des résultats des courbes de dispersion permettant de définir la géométrie du dispositif .

On rappelle que les ondes de Rayleigh ne présentent pas une décroissance géométrique similaire à celle des ondes de compression (figure 2.15 à la page 54). Elles créent un mouvement particulière elliptique rétrograde et sont dispersives. Ainsi, l'amplitude de ces ondes est fonction de la fréquence et non uniquement de la distance selon la relation 2.19 dans le cas où la distance entre les géophones est inférieure à la longueur d'ondes.

3.3.6.1 Courbes de dispersion théorique - Modèle sous Geopsy

Une structure à 4 couches a été modélisée pour représenter la planche 2 - ballast 30 cm et la planche 4 - sable 30 cm. Les données d'entrée de ce modèle concernent les paramètres suivants :

- l'épaisseur des couches,
- les vitesses des ondes de compression (V_P et V_S),
- la masse volumique des couches considérées.

Ces dernières sont définies à partir :

- des caractéristiques de mise en œuvre des planches 2 et 4 (e et ρ),
- des résultats de vitesse de propagation obtenues à partir des essais sismiques (V_P),
- et d'hypothèses de calcul reliant la vitesse V_S à V_P . En prenant une valeur de ν égale à 0,25, on obtient $V_S = \frac{V_P}{1,7}$. Le rapport des vitesses longitudinales et transversales est relié de façon biunivoque au coefficient de poisson ν (équation 3.6) de la façon suivante ([Bourbié et al., 1986](#); [Lavergne, 1986](#)) :

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2(1 - \nu)}{1 - 2\nu}} \quad (3.6)$$

Le tableau 3.14 recense les paramètres d'entrée de la couche en surface.

Les courbes de dispersion théoriques sont tracées sur la figure 3.45.

3 Expérimentations pour l'étude du ballast

Tableau 3.14 – Paramètres d'entrée de la couche de surface du modèle

Matériau	Ballast		Sable
Etat	Foisonné	Compacté	Compacté
Épaisseur (m)	0,33	0,29	0,3
V_p (m/s)	220	330	270
V_s (m/s)	128	191	157
ρ (kg/m ³)	1570	1800	1780

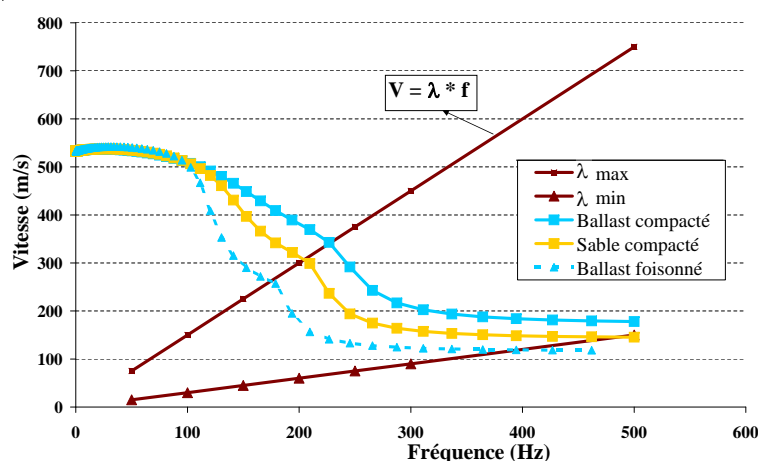


Figure 3.45 – Courbe de dispersion théorique dans 30 cm de ballast et 30 cm de sable et limites d'interprétation

Ces dernières sont bornées par rapport aux longueurs d'ondes minimale et maximale liées au dispositif de mesure (écartement entre géophones et longueur du dispositif de la flûte sismique). Les vitesses limites dépendent des paramètres de la flûte sismique. Elles sont calculées sur la gamme de fréquence considérée avec une longueur d'onde minimale de 30 cm et maximale de 1,8 m (figure 3.46) selon la relation $\lambda = \frac{V}{f_{max}}$. Il est ensuite possible de tracer les droites dites V_{min} et V_{max} (équations 3.7) sur les graphes de courbes de dispersion ; ces courbes définissent la gamme de validité de la mesure.

3.3 Résultats des mesures sismiques

$$V_{max} = \lambda_{min} \times f_{max} \quad (3.7)$$

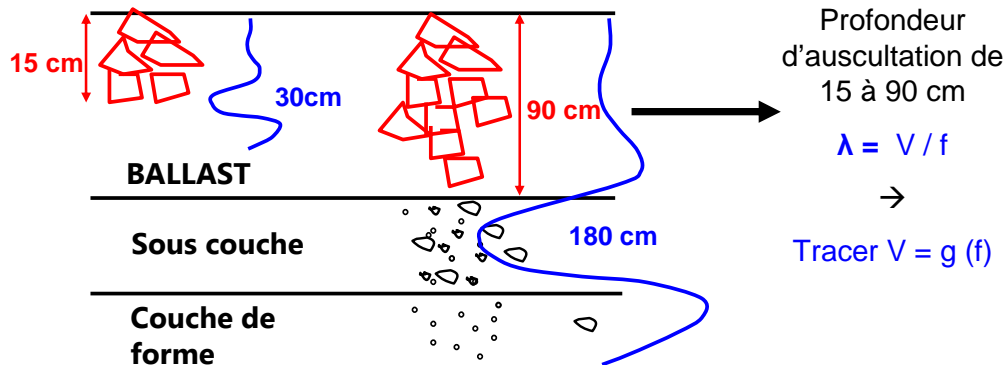


Figure 3.46 – Détermination des limites du modèle - bande de fréquences et longueurs d'onde mini et maxi

3.3.6.2 Courbes de dispersion expérimentales

Nombre de géophones de la flûte sismique La planche 1 a permis de déterminer le nombre nécessaire de géophones de la flûte sismique pour une auscultation de 30 cm de ballast. Une comparaison d'un même essai de la planche 1 montre que la résolution du diagramme de dispersion est insuffisante en prenant 8 des 24 géophones de la flûte sismique avec un offset de 25 cm (figure 3.47 (b)) ainsi que 16 géophones avec un offset de 1,15 m (figure 3.48) alors que les différents modes sont bien visibles avec 24 géophones et un offset de 25 et 48 cm (figure 3.47 (a) et 3.49). La vitesse des ondes de Rayleigh du mode 1 atteint 150 m/s, ce qui est plausible en comparant cette valeur avec la vitesse des ondes de compression V_S qui est supérieure.

Ces courbes de dispersion présente une difficulté de pointage du mode 1, ce qui peut provenir du dispositif de faible dimension privilégiant ainsi les hautes fréquences et de l'amortissement du ballast.

Pour une meilleure visibilité des résultats, les diagrammes de dispersion sont présentés dans la suite du document en niveau de gris et non avec l'échelle de couleurs définie par défaut sous le logiciel Geopsy.

Les données des planches de ballast ont été traitées en onde de surface de la façon suivante :

- traitement des enregistrements de la planche 1 avec 30 cm de ballast et 24 géophones monoaxiaux (figure 3.47),
- traitement des enregistrements de la planche 4 avec 30 cm de sable (figure 3.51),

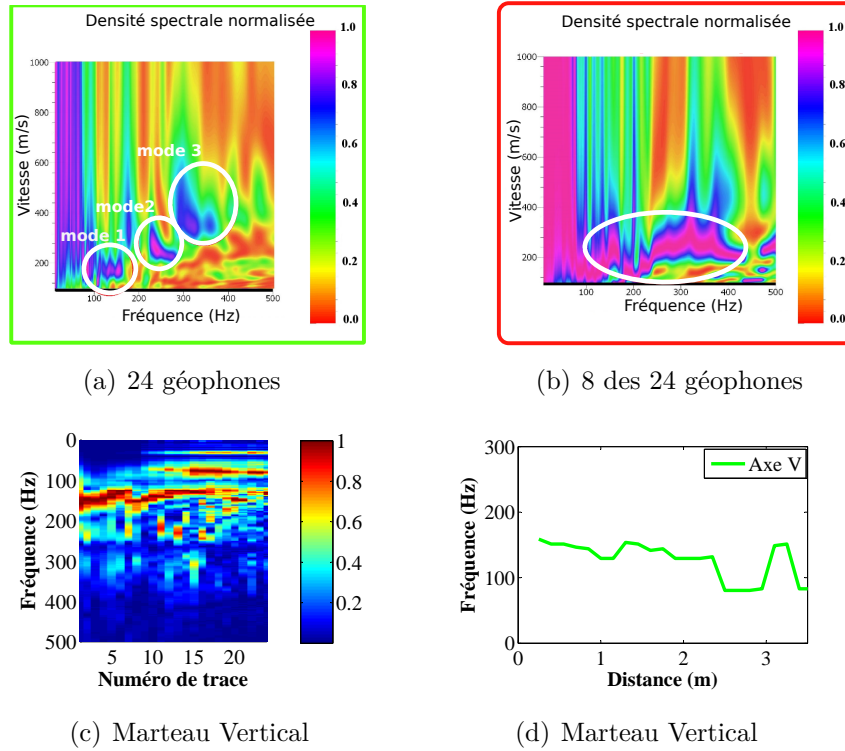


Figure 3.47 – Diagrammes de dispersion obtenus avec un même essai - Vibrateur inertiel - ballast foisonné - offset de 48 cm

- traitement des enregistrements de la planche 1 avec 30 cm de ballast et 8 géophones triaxiaux en moyennant les courbes de dispersion images réalisées sous Geopsy de tous les offsets (de 25 à 105 cm) ; l'objectif étant de retrouver les résultats de la flûte de 24 géophones pour ensuite appliquer ce traitement à 60 et 90 cm étant donné que, pour ces épaisseurs de la planche 2 nous n'avons pas fait de dispositif sismique avec 24 géophones. Malgré le nombre important d'essais, les courbes de dispersion obtenues manquent de résolution, ce qui ne permet pas de les exploiter de façon correcte. Ce constat reste vrai en faisant ce même traitement sur 16 géophones monoaxiaux (figure 3.48),
- traitement des enregistrements de la planche 3 avec 80 cm de ballast et 24 géophones monoaxiaux (figure 3.53).

Les mesures réalisées avec 24 géophones espacées de 15 cm sont satisfaisantes pour obtenir des courbes de dispersion dans le ballast.

3.3 Résultats des mesures sismiques

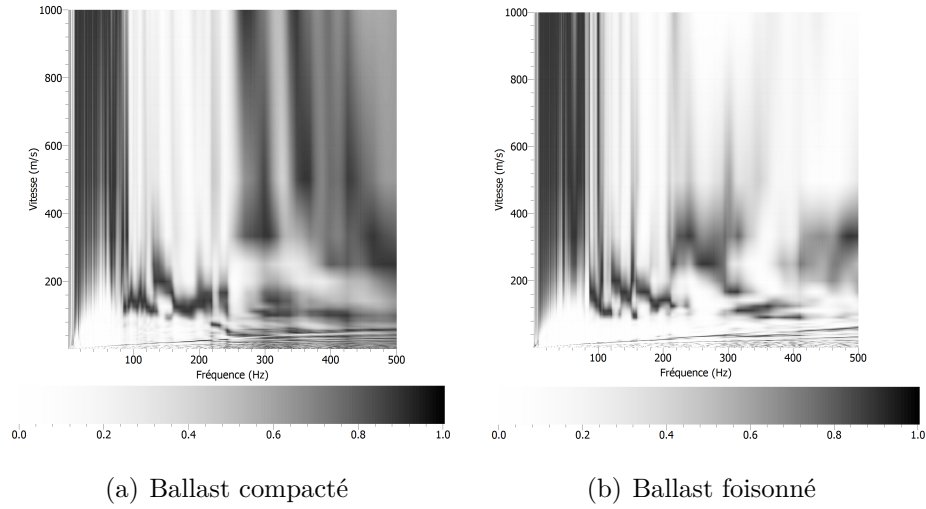


Figure 3.48 – Diagrammes de dispersion expérimentaux de la planche 1 sur 30 cm de ballast à partir de 16 géophones sur 24 - Offset 1,15 m

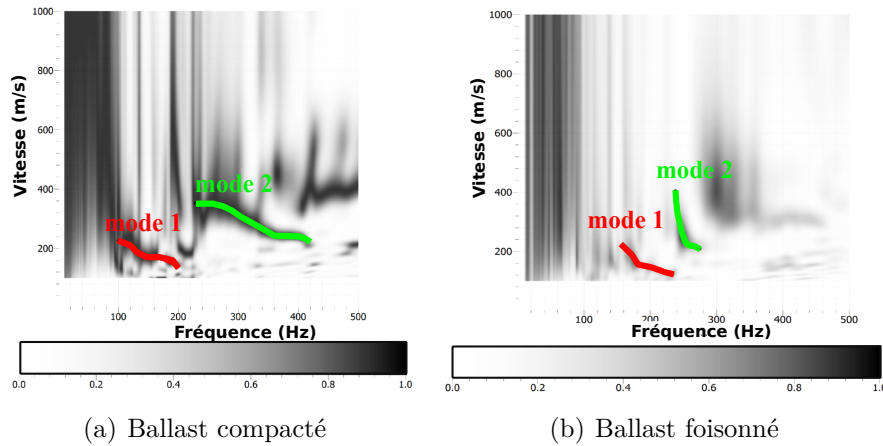


Figure 3.49 – Diagrammes de dispersion expérimentaux de la planche 1 sur 30 cm de ballast à partir de 24 géophones - offset 25 cm

Planche 1 - 30 cm La courbe de dispersion du mode fondamental (mode 1) est matérialisée par une courbe rouge et la courbe de dispersion du mode supérieur (mode 2) par une courbe verte (figure 3.49). Ces résultats indiquent qu'avec 30 cm de ballast nous obtenons des courbes de dispersion avec une bonne résolution si le dispositif comporte un offset de 25 cm et une flûte de 24 géophones espacés de 15 cm. Les courbes de dispersion obtenues avec 8 ou 16 géophones de la flûte sismique ne sont pas exploitables. Le nombre de capteurs n'est pas suffisant.

La vitesse de compression V_P mesurée dans le ballast atteint une valeur de 300 ± 40 m/s dans le plot compacté et 210 ± 20 m/s sur le plot foisonné

3 Expérimentations pour l'étude du ballast

suite aux mesures sismiques (paragraphe 3.3.3) d'où une vitesse de l'onde de Rayleigh inférieure à cette valeur pour le mode fondamental. Ce dernier est visible sur la figure 3.49 entre 100 et 200 Hz avec une vitesse de l'onde de Rayleigh comprise entre 50 et 150 m/s. La comparaison des deux états de serrage du ballast à l'offset de 25 cm indique une vitesse plus faible dans le ballast foisonné avec une différence de 100 m/s. Les courbes de dispersion du mode fondamental étant moins visibles et plus difficiles à pointer, nous avons fait la comparaison sur le deuxième mode (courbe mode 2 sur le graphe 3.50) avec une vitesse des ondes de Rayleigh comprise entre 150 et 250 m/s pour une fréquence comprise entre 200 et 400 Hz. Ces mesures sont comparées avec les courbes de dispersion théoriques déterminées sous le module gpdc de Geopsy (figure 3.50). Les vitesses théoriques sont supérieures à la réalité tant dans le sable que dans le ballast avec une différence de 100 m/s. Le mode fondamental mode 1 des courbes de dispersion du ballast compacté et foisonné ne montre pas de réelle différence entre les deux états de serrage. Ceci peut être dû à un mauvais pointé des courbes de dispersion étant donné qu'à basses fréquences, les courbes sont perturbées.

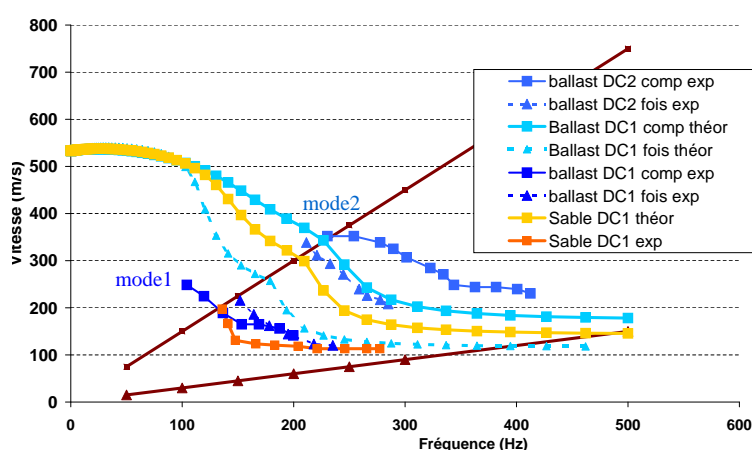


Figure 3.50 – Comparaison des courbes de dispersion théoriques et expérimentales - planche 2 avec 30 cm de ballast et planche 4

Dans le cas d'une couche de 30 cm de sable, il est possible d'obtenir de bonnes courbes de dispersion avec un offset à 1,3 m (figure 3.51).

Planche 4 - 30 cm de sable Les enregistrements de la planche 4 avec 30 cm de sable ont été traités sous Geopsy (figure 3.51)

La courbe de dispersion du mode fondamental (mode 1) obtenue avec un dispositif de 16 géophones et un offset de 130 cm est de bonne qualité pour le sable (figure 3.51) et l'est moins pour le ballast (figure 3.52) qui est un milieu très amortissant. Les géophones ne sont pas assez nombreux pour le ballast et les géophones sont trop éloignés de la source.

3.3 Résultats des mesures sismiques

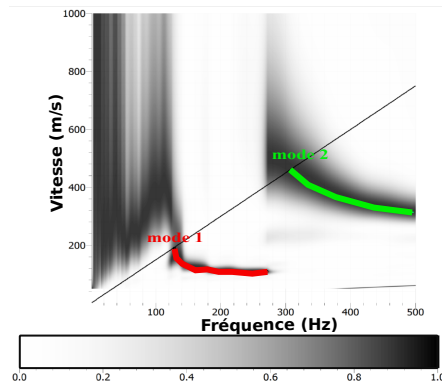


Figure 3.51 – Courbes de dispersion expérimentales de la planche 4 dans 30 cm de sable compacté

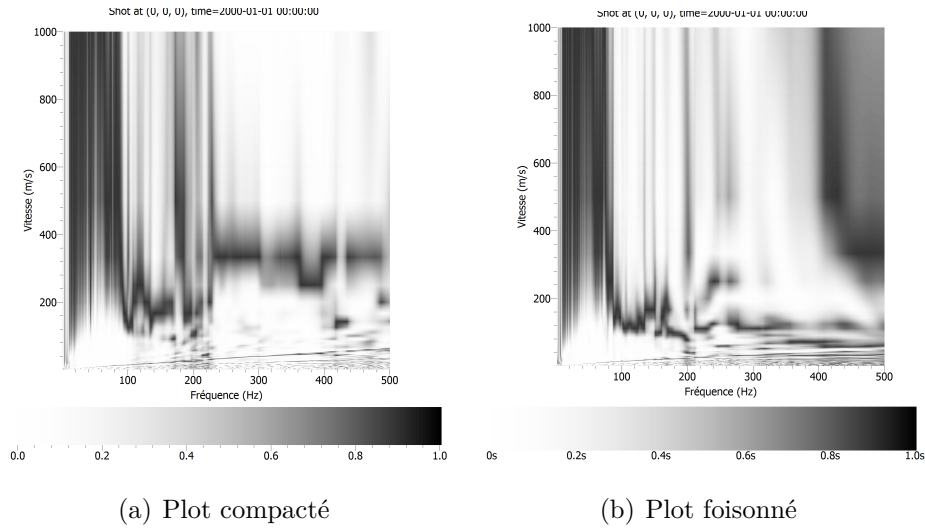


Figure 3.52 – Courbe de dispersion expérimentales de la planche 1 sur 30 cm de ballast à partir de 16 géophones sur 24 - Offset 1,3 m

Planche 3 - 80 cm de ballast L'objectif de ces essais est de voir si les courbes de dispersion avec une épaisseur plus conséquente de ballast sont de bonne qualité ou non. Les courbes moyennes sont obtenues à 25, 55 et 110 cm d'offset. La figure 3.53 montre les résultats avec un offset de 25 cm. L'éloignement de la source par rapport à la flûte sismique ainsi que l'état foisonné du ballast conduisent à la détérioration des résultats des courbes de dispersion. Les résultats à 25 cm d'offset sont cohérents avec ceux obtenus sur la planche 2 avec 30 cm de ballast. Le mode fondamental de la courbe de dispersion est visible dans une bande de fréquence comprise entre 100 et 200 Hz avec une vitesse de 100 m/s. La vitesse des ondes de Rayleigh dans le ballast compacté serait a priori de 150 m/s et dans le ballast foisonné de 100 m/s.

3 Expérimentations pour l'étude du ballast

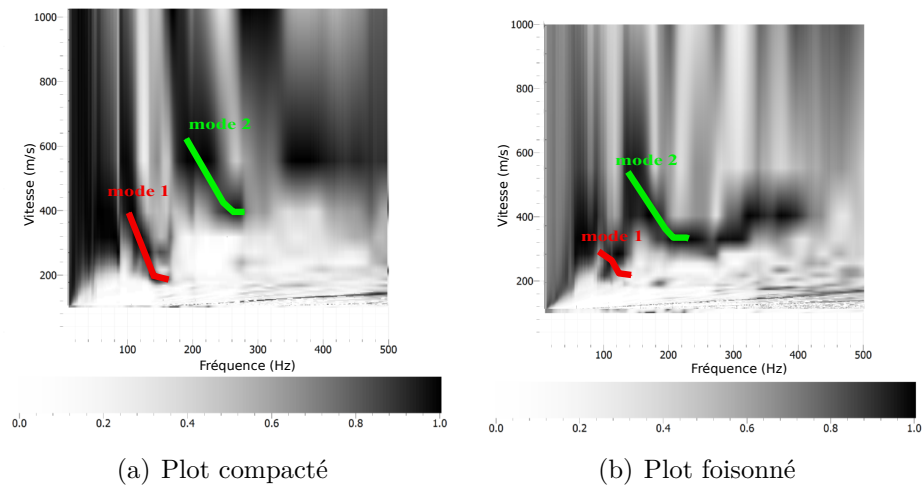


Figure 3.53 – Moyenne des courbes de dispersion expérimentales de la planche 3 sur 80 cm de ballast - 24 géophones monoaxiaux - Offset 25 cm

Les courbes de dispersion théoriques présentent des vitesses de 100 à 200 m/s supérieures à celles des courbes de dispersion expérimentales.

Deux hypothèses sont envisageables quant à cette observation :

- soit les hypothèses des paramètres de modélisation ne sont pas bonnes et il conviendrait de faire une étude paramétrique afin de se rapprocher du modèle,
- soit le milieu ne répond pas aux lois de comportement d'un milieu continu (ondes non sphériques).

3.4 Synthèse des résultats

Les travaux de cette thèse portent essentiellement sur l'étude in situ du comportement du ballast ferroviaire par le déploiement d'expérimentations en grandeur réelle. Seule l'absence de la superstructure ne reflète pas les conditions réelles du chantier. Ce choix provient de la nécessité d'étudier la réponse du ballast dans un cas simple sans panneau de voie afin d'éviter les réflexions parasites liées aux hétérogénéités créées par la présence de la succession des traverses.

La connaissance des paramètres de mise en œuvre permet d'accéder à la valeur réelle de masse volumique des différentes expérimentations mises en œuvre avec du ballast compacté et du ballast foisonné. La variation de ces deux états extrêmes de compactage étant de 20 % avec une masse volumique moyenne de $1,8 \text{ t/m}^3$ pour le ballast compacté et de $1,5 \text{ t/m}^3$ pour le ballast foisonné.

Les résultats des expérimentations sont synthétisés ci-dessous : Le rapport signal sur bruit calculé sur les enregistrements sismiques définit une gamme de fréquences utiles sur le ballast comprise entre 50 et 500 Hz avec une source impulsionnelle comme le marteau vertical. Ce traitement permet de restreindre la zone fréquentielle des traitements des signaux sismiques.

La vitesse des ondes de compression calculée à partir de la détection de l'arrivée des ondes sur les 24 géophones de la flûte sismique instrumentant le ballast montre la présence de deux horizons bien distincts alors qu'on aurait pu s'attendre à une succession d'interfaces, du fait du caractère discret du ballast.

La vitesse de propagation dans le ballast compacté atteint une valeur de $300 \pm 40 \text{ m/s}$ tandis que le ballast foisonné atteint une valeur moyenne de $210 \pm 20 \text{ m/s}$. L'écart-type provient de la variabilité liée au nombre d'essais sur les différentes épaisseurs de ballast (de 30 à 90 cm de ballast).

Suivant la théorie, la vitesse réfractée (V_2), devant refléter l'interface ballast/GNT, devrait être invariante quelle que soit l'épaisseur de ballast. Or ce n'est pas le cas, la vitesse V_2 atteint une vitesse de $750 \pm 250 \text{ m/s}$ pour le ballast compacté et $400 \pm 100 \text{ m/s}$ pour le ballast foisonné.

Hypothèse : La variation de la vitesse des ondes réfractées en fonction de l'épaisseur de ballast indique que la réfraction n'intervient pas sur l'interface ballast / sous-couche mais refléterait une réfraction sur une interface de compactage. Ce constat est d'autant plus vrai pour le cas de ballast compacté. Il est ainsi possible de faire un suivi de l'épaisseur de ballast par la propagation des ondes sismiques en déterminant la fonction de transfert. Il apparaît une plus grande difficulté à détecter l'arrivée des ondes dans le cas foisonné car le milieu est tellement amortissant que les derniers capteurs de la flûte sismique

se trouvent dans le bruit de fond sismique.

Les résultats de propagation dans le sable (milieu continu) en comparaison avec le ballast conduisent à des valeurs de vitesses de l'ordre de 280 m/s alors que l'on devrait atteindre une vitesse de l'ordre de 1200 m/s pour ce type de matériau à la densité de $1,7 \text{ t/m}^3$. L'état hydrique peut être une cause de ce résultat ; le sable est en effet dans un état sec suivant les références Proctor.

Mesures complémentaires sur la sous-couche ferroviaire. Afin de comprendre les résultats de vitesse réfractée obtenus à partir de la flûte sismique déployée sur le ballast, des mesures complémentaires ont été déployées sur la sous-couche ferroviaire. Ces dernières conduisent à des vitesses de $575 \pm 50 \text{ m/s}$, valeurs très différentes de la vitesse réfractée V_2 mesurée sur la flûte sismique instrumentant le ballast variant de $800 \pm 400 \text{ m/s}$. Ces résultats doivent être pris avec précaution car les signaux sismiques indiquent une anomalie. Cette erreur sur le résultat peut être liée aux conditions de mise en œuvre des géophones dans la sous-couche ferroviaire.

Calcul des épaisseurs de couches. À partir de ces vitesses et suivant les lois de Snell-Descartes, les épaisseurs des couches ont été calculées montrant des résultats cohérents entre le calcul et la réalité sauf pour l'épaisseur de 90 cm de ballast qui diverge avec une valeur réelle de 102 cm tandis que la valeur calculée est de 48 cm. Ce constat peut provenir de l'effet d'une trop grande épaisseur de ballast. Une erreur de 30 % est déterminée entre le calcul et la mesure de l'épaisseur montrant que les ondes dans le ballast sont soumises à des phénomènes complexes qui n'obéissent pas aux lois de Snell-Descartes. Néanmoins cette analyse reflète uniquement une mesure pour chaque épaisseur de ballast. Il conviendrait de poursuivre et faire une analyse plus poussée afin d'obtenir un écart-type sur la mesure.

L'amortissement global des ondes a été analysé en traitant les signaux de chaque géophone en surface de la flûte sismique pour les différentes sources de sollicitation avec l'intensité d'Arias que l'on a ensuite normalisée par rapport au premier géophone de la flûte sismique. La droite d'amortissement, qui n'est pas identique entre les différentes sources, montre que le matériau présente un comportement non linéaire car il est fonction de l'énergie de la source. La pente d'amortissement est plus forte dans le cas du ballast par rapport au sable et du ballast compacté par rapport au ballast foisonné, ceci étant vrai pour les épaisseurs supérieures à 30 cm. Ces conclusions montrent que les phénomènes en jeu sont complexes. En effet, on s'attend à avoir un amortissement plus fort dans le ballast foisonné alors que ce n'est pas le cas. Le comportement du ballast présente un amortissement intrinsèque au matériau qui est fortement influencé par les chaînons de force et moins par la compacité de ce matériau.

L'amortissement des ondes au travers de la couche de ballast conduit à des résultats similaires. En effet le ballast foisonné amortit moins

3.4 Synthèse des résultats

l'onde que le ballast compacté. Plusieurs hypothèses sont envisageables pour ce résultat inattendu : phénomènes complexes liés à un milieu discret montrant la prépondérance des chaînons de force sur le comportement du ballast, problème de placement de la source à l'aplomb des capteurs et de façon identique entre les plots compacté et foisonné, et la difficulté de maintenir un état de serrage foisonné du ballast avec les nombreux essais réalisés sur la structure. Néanmoins ces résultats montrent la non linéarité de ce matériau avec une courbe d'amortissement différente pour deux sources avec des énergies différentes.

Amortissement du ballast en instrumentant la sous-couche. Les résultats d'amortissement des ondes sismiques en instrumentant la sous-couche ferroviaire montrent un amortissement similaire aux résultats de pression décrits ci-dessus avec une valeur d'amortissement de 50 % à l'aplomb du centre des traverses adjacentes. Le résultat des autres points des traverses adjacentes à la traverse principale ne reflète pas une décroissance géométrique et est fortement influencé par les chaînons de force.

Le traitement fréquentiel des capteurs scellés et posés indique qu'il est préférable de sceller les capteurs afin de moyenniser l'effet de la transmission du signal à travers le ballast. La fréquence prépondérante dominante pour les différentes sources est comprise entre 100 et 250 Hz. Les résultats montrent que l'épaisseur de ballast n'influencerait a priori pas l'amortissement fréquentiel des ondes à la différence de l'état de serrage qui joue un rôle important. Le ballast foisonné présente une réponse fréquentielle moins étendue que le ballast compacté qui amortit moins les fréquences. Nous observons que la vitesse spectrale varie en fonction de la fréquence, mettant ainsi en évidence le caractère dispersif des ondes dans ce milieu.

Les courbes de dispersion dans le ballast indiquent qu'il est nécessaire d'instrumenter le ballast au moyen de 24 géophones et un offset de 25 cm afin d'obtenir une bonne résolution des courbes de dispersion. Le mode fondamental de la courbe de Rayleigh est plus difficile à pointer, ce qui conduit à peu de différence entre le ballast compacté et le ballast foisonné. Les valeurs de vitesse des ondes P ont permis de définir que le mode le plus visible n'était pas le mode fondamental étant donné que la vitesse V_P atteinte est de 300 m/s. La valeur de V_R doit atteindre une vitesse inférieure à cette valeur. Le pointé des courbes de dispersion conduit à une vitesse de Rayleigh dans le ballast d'environ 200 m/s pour des fréquences de l'ordre de 150 Hz.

À ce jour, la littérature comporte peu de travaux sur la caractérisation sismique du ballast (Zagyapan & Fairfield, 2002; Anbazhagan et al., 2010, 2011; Hwang & Park, 2014). Ceux qui existent sont succincts et il n'a pas été possible de retrouver certains résultats en traitant nos signaux sismiques en dispersion (Zagyapan & Fairfield, 2002; Anbazhagan et al., 2010, 2011) et par des traitements temps fréquence (Hwang & Park, 2014).

3 Expérimentations pour l'étude du ballast

Les valeurs de dispersion obtenues pour le premier mode dans le ballast ne sont pas similaires à celles de [Zagyapan & Fairfield \(2002\)](#); [Anbazhagan et al. \(2010, 2011\)](#) sur les valeurs de fréquence et le sont sur les valeurs de vitesses de l'onde de Rayleigh avec une valeur de 150 m/s. La fréquence de nos travaux est plus élevée (150 Hz au lieu de 60 Hz) ce qui était attendu, étant donné l'épaisseur du ballast et la longueur d'onde nécessaire à l'auscultation de ce milieu.

Les résultats des ondes de surface de l'étude de [Anbazhagan et al. \(2010, 2011\)](#) montrent que la vitesse des ondes de cisaillement augmente avant le taux d'encrassement en fines du ballast (point d'encrassement optimal, équivalent à 39 % pour un encrassement au pétrole et à 36 % avec l'argile), et diminue après. Le dispositif comprend 12 géophones espacés de 25 cm, un offset à la source de 50 cm et un marteau de 1 kg. La vitesse des courbes de dispersion est de 150 m/s avec des fréquences de 35 à 60 Hz.

Le modèle théorique de courbes de dispersion réalisé sous le logiciel Geopsy représente la structure expérimentale à 4 couches. Les courbes théoriques présentent des vitesses supérieures à la réalité. Les courbes de dispersion expérimentales sont peu différentes entre les deux états de serrage sur le mode fondamental. Ce constat peut provenir de l'épaisseur d'auscultation supérieure à l'épaisseur du ballast. La différence entre le ballast compacté et le ballast foisonné est d'ailleurs bien visible sur le premier mode supérieur (fréquences supérieures). Les courbes de dispersion obtenues sur le milieu continu en sable présentent une très bonne résolution et des valeurs de vitesse de 70 à 90 m/s avec des fréquences variant de 150 à 300 Hz.

3.5 Conclusion

Le travail expérimental du chapitre 3 est une composante majeure de ce mémoire. Il permet de mettre en évidence l'importance de déployer une instrumentation adaptée pour ausculter la couche de ballast :

- le nombre de capteurs doit être suffisant pour atteindre une bonne résolution des courbes de dispersion et aussi pour visualiser les vitesses de l'hodochrone. Ce nombre a été fixé à 24 ;
- il est nécessaire de sceller les capteurs au plâtre afin de garantir une réponse moyennée sur quelques éléments de ballast (résultats visibles par le traitement fréquentiel) ;
- le milieu étant très amortissant, il convient de prendre un offset à la source de 25 cm ;
- l'épaisseur de ballast étant restreinte sur voie à 30 voire 60 cm, les géophones doivent être écartés de 15 cm au maximum.

Les résultats obtenus dans la littérature sans scellement des capteurs doivent ainsi être pris avec précautions.

Pour une masse volumique du ballast variant de $1,5 \text{ t/m}^3$ à $1,8 \text{ t/m}^3$ (variation de 20 %), on obtient respectivement une vitesse de propagation de l'onde de compression V_1 moyenne de $210 \pm 20 \text{ m/s}$ à $300 \pm 40 \text{ m/s}$ (variation de 30 %). Ceci montre que l'effet du paramètre de compacité influence la vitesse des ondes de compression. Les résultats de vitesse de propagation de l'onde réfractée V_2 semblent mettre en évidence l'interface de compactage du ballast, ce qui pourrait être intéressant pour le suivi sur chantier de l'épaisseur de ballast mis en œuvre.

Le calcul des épaisseurs théoriques en suivant les lois de Snell-Descartes est cohérent avec les épaisseurs (30 et 60 cm) mesurées expérimentalement avec une erreur de 19 à 30 %. Les cas avec des épaisseurs conséquentes 102 cm de ballast compacté et de 95 cm de ballast foisonné (épaisseur objectif de 90 cm) où l'erreur atteint une valeur respective de 53 et 60 % ne répondent plus à ces lois, ce qui montre des phénomènes complexes mis en jeu.

Nous nous attendions à ce que le ballast foisonné amortisse plus les ondes que le ballast compacté. Cette prévision n'est pas vraie pour les mesures horizontales de l'amortissement de l'onde pour le cas avec 30 cm d'épaisseur de ballast mais aussi pour l'amortissement vertical. Ainsi l'amortissement intrinsèque d'un matériau discret comme le ballast serait plus influencé par les chaînons de force que par la compacité même de ce matériau.

Les courbes d'amortissement global des ondes normalisées ne sont pas identiques suivant les différentes sources, ce qui montre la non linéarité du ballast. L'accélération enregistrée entre le ballast et la sous-couche présente un amortissement à l'aplomb de la sollicitation de 92 % avec le marteau V et

3 Expérimentations pour l'étude du ballast

de 96 % avec la chute de masse. Latéralement, sur les capteurs implantés au centre fictif de traverses adjacentes, l'amortissement est encore de 50 %.

La fréquence prépondérante dominante pour les différentes sources est comprise entre 100 et 250 Hz. Les résultats montrent que l'épaisseur de ballast n'influencerait **a priori** pas l'amortissement fréquentiel des ondes à la différence de l'état de serrage, qui joue un rôle important. Le ballast foisonné présente une réponse fréquentielle moins étendue que le ballast compacté qui amortit moins les hautes fréquences. Le caractère dispersif des ondes dans ce milieu est mis en évidence sur les traitements fréquents.

La vitesse de cisaillement approximée à partir de [Mari et al. \(1997\)](#), $V_S = \frac{V_P}{1,7}$ (pour un ν de 0,25) et [Viktorov \(1965\)](#) $V_R = 0,9 V_S$ devrait approcher 111 m/s dans le ballast foisonné et 158 m/s dans le compacté, ce que nous visualisons à une fréquence de 150 Hz sur le mode fondamental mais avec une moins bonne résolution que sur le mode supérieur. Dans ce contexte, le mode avec une bonne résolution à une fréquence de 300 à 400 Hz présentant une vitesse de Rayleigh de 200 m/s dans le ballast foisonné et de 250 m/s dans le ballast compacté doit être un mode supérieur. Les vitesses de Rayleigh des courbes de dispersion de [Anbazhagan et al. \(2011\)](#) atteignent une valeur de 150 m/s mais à une fréquence de 30-60 Hz. Ces fréquences apparaissent faibles par rapport à la longueur d'onde utile pour l'auscultation d'une épaisseur de 30 cm. En effet, dans ce cas, la longueur d'onde correspondrait à 5 m de profondeur alors que dans notre cas, pour une fréquence de 150 Hz, elle atteint 1 m, ce qui est plus réaliste pour ausculter le ballast.

Le modèle théorique des courbes de dispersion n'est pas bien calé aux résultats de l'expérimentation ce qui peut être expliqué soit par les paramètres de la modélisation. Dans ce cas, il conviendrait de faire une étude paramétrique afin de déterminer les paramètres soit par le milieu qui ne répond pas aux lois de comportement d'un milieu continu.

La simulation du chapitre 4 vient compléter ce travail. Elle a pour but d'étudier la possibilité de modéliser le ballast de façon discrète et aussi de façon continue afin d'illustrer les conclusions précédentes.

Simulation numérique de la réponse dynamique d'une couche de ballast

4.1 Introduction

Le ballast est utilisé dans les voies ferrées en vue d'amortir les efforts du matériel roulant. Ce matériau présente de nombreux avantages mais sa réponse à des sollicitations dynamiques est mal connue. Les mécanismes de propagation d'ondes et de chaînons de forces sont influencés par le caractère discret et le comportement non-linéaire du ballast ainsi que par les vides entre la traverse et le ballast.

Le comportement des matériaux non liés assimilés à des milieux continus est de type élastique non-linéaire durcissant, en se basant sur des hypothèses de réversibilité et de convexité de la relation contraintes/déformations ([Saint-Laurent, 2008](#)). Ceci se traduit par un module d'élasticité variable en fonction de l'état de contraintes, et donc en fonction de la profondeur (figure 4.1).

Dans un milieu élastique linéaire les contraintes sont proportionnellement liées aux déformations, ce qui n'est pas le cas d'un milieu non-linéaire. [Saint-Laurent \(2008\)](#) a représenté le module d'élasticité d'un matériau non-linéaire en fonction de la profondeur dans un code d'éléments finis en utilisant un modèle hyperélastique de Boyce (module CVCR de CESAR-LCPC).

La propagation des ondes est caractérisée par différents phénomènes : dispersion, diffraction, amortissement, conversions de type d'ondes, etc. Ces caractéristiques sont nécessairement approximées par le calcul numérique afin de mieux appréhender l'expérimentation car les phénomènes sont complexes.

Dans le cas (1D), le ballast est modélisé par des systèmes simples (masse-ressort-amortisseur). Dans les cas (2D) et (3D), il est représenté soit par un modèle discret, soit par un modèle continu.

Ce chapitre va traiter essentiellement de la comparaison entre une simulation numérique continue, une simulation numérique discrète et l'analyse expérimentale de la transmission d'une sollicitation sismique dans une couche de ballast de faible dimension (plot de 1x1x0,15 m) en appui sur un support rigide en acier.

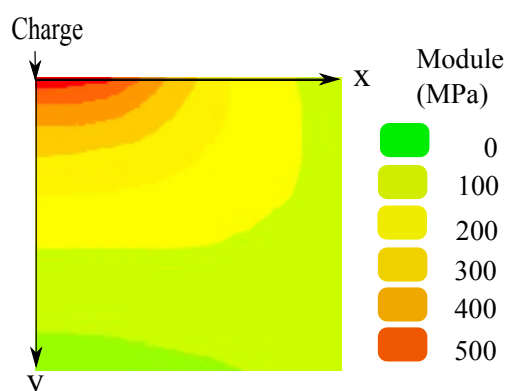


Figure 4.1 – Module d'élasticité en fonction de la profondeur - Exemple de simulation 2D axisymétrique non-linéaire d'une couche de chaussée en grave non traitée avec le modèle de Boyce (CESAR-CVCR) - [SaintLaurent \(2008\)](#)

Un modèle numérique discret pour l'étude de la chute de blocs issu des travaux de [Dimnet \(2002\)](#); [Dal Pont, S. & Dimnet \(2008\)](#) permet de simuler la réponse d'une couche de ballast. Ce travail est comparé à une simulation continue par éléments finis (CESAR-LCPC).

L'écriture d'un modèle mathématique, exprimant la réponse d'un milieu à une sollicitation, est fondée sur l'analyse de mesures expérimentales mettant en relation les efforts (ou contraintes) et les déformations. Les méthodes classiques répondant à ces hypothèses de milieu continu sont pertinentes pour des longueurs d'onde adaptées (chapitre 3). Ainsi, avec de grandes longueurs d'ondes, il est possible de considérer la couche de ballast dans son ensemble et avoir un comportement se rapprochant d'un milieu continu. Dans le cas de faibles longueurs d'ondes, la diffraction est prépondérante dans les phénomènes en jeu. Le ballast est plutôt représentatif d'un milieu discret. La modélisation continue nécessite une étude paramétrique pour déterminer les données d'entrée optimales du modèle. Dans ce contexte, nous avons d'abord choisi d'utiliser les paramètres définis dans la littérature pour lesquels la modélisation continue fonctionne **a priori** bien afin de les utiliser dans un calcul par éléments finis (code CESAR-LCPC). Nous avons ensuite ajusté les paramètres afin de s'approcher au mieux des données expérimentales.

Cette modélisation a pour but de valider la représentation du ballast par un milieu continu pour cette configuration d'essais en comparant le résultat avec l'expérimentation. Ce dispositif de faible dimension ne reflète pas la réalité d'une structure ferroviaire étant donné que la couche sous-jacente au ballast est rigide. La souplesse de la sous-couche influence en effet le comportement du ballast ([Martin, 2014](#)).

Le modèle discret met en relation les efforts et les vitesses d'une biblio-

4.2 État de l'art sur la modélisation du ballast

thèque de particules de ballast.

Les comparaisons entre l'expérimentation et les deux modèles doivent permettre de voir l'évolution du signal à travers une couche de 15 et de 30 cm de ballast afin de mieux comprendre les phénomènes et d'apprécier la pertinence des méthodes de modélisation continue et discrète.

4.2 État de l'art sur la modélisation du ballast

4.2.1 Modélisation continue

4.2.1.1 Loi de comportement

Il est difficile de déterminer un modèle de comportement adapté au ballast. La mécanique des milieux continus présente une limitation importante dans la modélisation continue d'un matériau discret comme le ballast. Le comportement mécanique d'un matériau assimilé à un milieu continu est régi par une loi rhéologique, propre à ce matériau, qui relie le tenseur des contraintes $\underline{\underline{\sigma}}$ au tenseur des déformations $\underline{\underline{\varepsilon}}$. Cette loi de comportement dérive d'une approche dite macroscopique car elle prend en compte un Volume Élémentaire Représentatif (VER) qui dépend de la taille des particules Φg où la longueur d'onde et l'épaisseur de la couche à ausculter doivent être bien supérieures à cette valeur. Le rapport entre l'épaisseur à ausculter et le VER doit être suffisamment grand ($\frac{e}{VER} < 10$) afin de se placer dans un contexte de modèle continu (figures 4.3 et 4.2 et références [Saussine \(2004\)](#); [Ricci et al. \(2005\)](#)).



Figure 4.2 – Volume élémentaire représentatif - modèle continu

Cette modélisation du ballast est une approche très simplifiée car les milieux formés d'empilements de sphères ne sont pas du ballast.

Les hétérogénéités au niveau microscopique (ex : pores intergranulaires, variabilité de la forme et de la taille des grains, etc.) n'influencent plus le comportement du matériau. Ainsi le comportement du matériau doit être attaché au volume élémentaire conduisant, dans notre cas de ballast, à des volumes de matériaux beaucoup plus grands que dans la réalité.

L'élaboration de la loi de comportement se fonde sur l'analyse de résultats expérimentaux et sur la mise en évidence des mécanismes physiques. Il y a

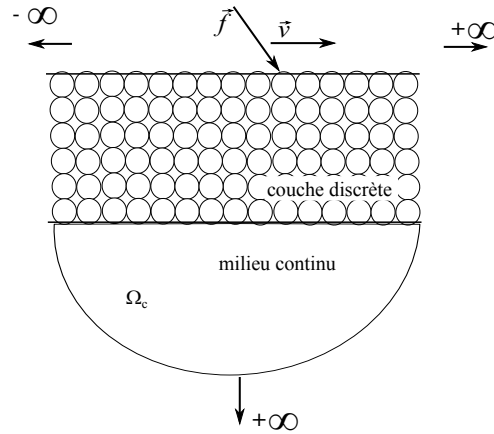


Figure 4.3 – Schéma du modèle discret / continu décrit par Ricci et al. (2005)

souvent lieu d'étudier la courbe (σ, ε) lors d'une sollicitation de charge suivie d'une décharge avec retour à l'état de contrainte initial.

Les mécaniciens des sols ont été amenés à distinguer différents types de lois de comportement (réversibles et irréversibles) telles que l'élasticité (linéaire et non-linéaire), la viscosité, la plasticité et leurs combinaisons (viscoélasticité, élasto-plasticité et viscoplasticité). Pour de nombreux matériaux, on observe que la courbe (σ, ε) (figure 4.4) présente deux parties distinctes : une partie linéaire correspondant à un comportement réversible du matériau (élasticité) et une partie non-linéaire correspondant à un comportement irréversible à partir de la limite élastique (ε_p) . Lorsqu'une courbe contraintes-déformations présente une asymptote parallèle à l'axe des déformations, on dit qu'elle présente un palier de plasticité avec un seuil de plasticité. En général, lorsque ce dernier est atteint, le solide subit de grandes déformations à contrainte constante. Toutefois, dans certains matériaux, la courbe (σ, ε) peut présenter un pic avant d'atteindre ce palier.

Les déplacements du ballast sont essentiellement dus aux réarrangements immédiats des particules solides, qui entraînent un changement de volume du squelette granulaire. Dans le cas d'un milieu considéré comme continu, sans choc entre les éléments, l'équation du mouvement prise en compte pour la dynamique correspond à l'équation de Cauchy.

Plusieurs modèles simplifiés (figure 4.5) permettent de prendre en compte le comportement viscoélastique et élastique d'un matériau en considérant le sol comme un système ressort - amortisseur en série (Modèle de Maxwell) ou en parallèle (Modèle de Kelvin-Voigt). Des modèles plus élaborés existent, prenant en compte une masse ou un ressort complémentaire (modèle de Zener ou Maxwell généralisé, Kham (2004); Maldonado (2008)).

4.2 État de l'art sur la modélisation du ballast

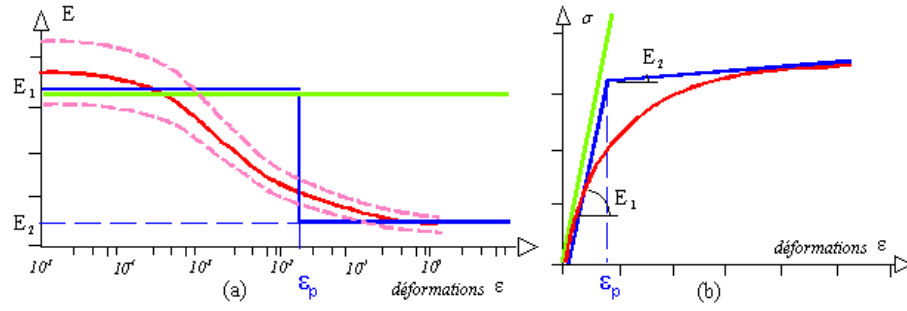


Figure 4.4 – Lois de comportement et évolution du module E avec la déformation ε (Nguyen, 2008)

Plusieurs modèles connus sont représentés sur la figure 4.5. Ces modèles sont constitués d'assemblage de ressorts de raideur E (module de compression) et d'amortisseurs de viscosité η . Le modèle de Zener permet de représenter le comportement anélastique d'un milieu. Il est très utilisé en mécanique des matériaux et rend compte du comportement d'un très grand nombre de roches. Les modèles de Kelvin-Voigt et de Maxwell sont plus simples et correspondent à des cas limites du modèle de Zener. Le modèle de Kelvin-Voigt est obtenu pour un module en très petites déformations. Il est utilisé pour rendre compte du comportement de matériaux solides. Le modèle de Maxwell correspond au cas où le module en grande déformation tend vers 0. Ce dernier est utilisé pour des matériaux sujets au fluage. La définition théorique de ces modèles est bien illustrée dans la thèse de Kham (2004). La vitesse de phase varie en fonction des paramètres viscoélastiques du modèle (module et amortissement). Ce phénomène est appelé dispersion matérielle. La figure 4.5 compare l'atténuation Q^{-1} suivant différents modèles viscoélastiques (Maxwell, Zener, Kelvin) où Q est le facteur de qualité.

L'analyse de la réponse dynamique linéaire du milieu par éléments finis peut s'effectuer par intégration directe dans le temps (voir par exemple le module DYNi de CESAR-LCPC, logiciel d'éléments finis). Cela permet de résoudre pas à pas l'équation 4.1 d'équilibre dynamique :

$$[M]\ddot{X}(t) + [C]\dot{X}(t) + [K]X(t) = F(t) \quad (4.1)$$

avec :

- $X(t)$: vecteur des déplacements nodaux de la structure considérée,
- $\dot{X}(t)$, $\ddot{X}(t)$: vecteurs vitesse et accélération,
- $F(t)$: vecteur des charges imposées en fonction du temps (N),
- $[M]$, $[C]$ et $[K]$: matrices de masse (kg), amortissement (Ns/m) et rigidité de la structure (N/m).

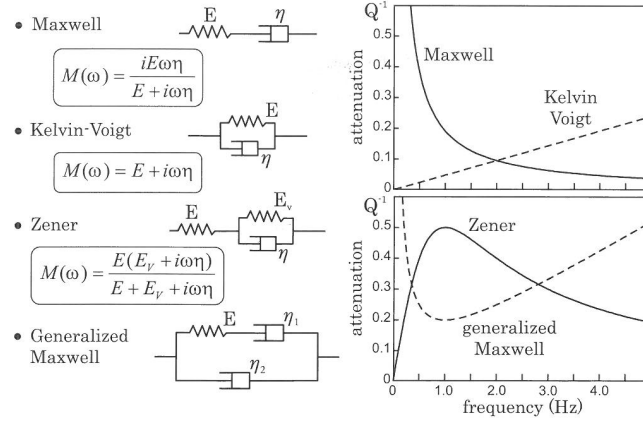


Figure 4.5 – Divers modèles rhéologiques : expressions des modules complexes $M(\omega)$ et des courbes d'amortissement correspondantes Q^{-1} (Semblat & Pecker, 2009)

4.2.1.2 Amortissement

De ce fait, la modélisation de la propagation des ondes est réalisée en prenant des modèles viscoélastiques qui prennent en compte un amortissement (Semblat & Pecker, 2009). Dans un milieu parfaitement élastique, une onde plane peut se propager indéfiniment sans perte d'énergie si elle ne rencontre pas d'obstacle. Dans la réalité, un tel milieu n'existe pas. A mesure qu'elle se propage, l'onde perd progressivement son énergie (e.g. dissipation par frottement) et finit par disparaître. Cette dissipation d'énergie est une propriété intrinsèque de tout milieu matériel : on l'appelle amortissement matériel.

Amortissement géométrique Pour un sol à comportement élastique, le seul facteur de décroissance des vibrations est lié à la distance. Cette décroissance est dite « géométrique ». Dans ce cas le matériau peut être modélisé par un milieu élastique qui ne présente pas de dissipation d'énergie. À la surface du sol, l'amortissement géométrique de l'onde de surface est proportionnel à $\frac{1}{\sqrt{R}}$ et celui des ondes de volume S et P en $\frac{1}{R^2}$ où R est la distance à la source (Aki & Richards, 1980).

Amortissement intrinsèque Expérimentalement, on observe que l'amortissement des ondes est plus rapide que celui prévu par la décroissance géométrique, d'où l'introduction d'un amortissement dit « intrinsèque ». Il est lié à la libération d'énergie sous forme de chaleur (ou frottements sous sollicitations dynamiques), qui est fonction du type de sol. Dans la plupart des études de propagation d'ondes, les énergies mises en jeu sont suffisamment faibles pour que les déformations restent petites. Néanmoins, la relation

4.2 État de l'art sur la modélisation du ballast

contrainte-déformation obtenue expérimentalement lors d'un chargement cyclique est curviligne, et forme une boucle d'hystérésis montrant un comportement réel non-linéaire avec dissipation d'énergie. L'aire que limite la boucle charge-décharge est proportionnelle à l'énergie dissipée au cours du cycle. Le rapport de cette énergie dissipée à l'énergie maximale emmagasinée au cours du chargement définit un coefficient d'amortissement interne η ou d'après [Aki & Richards \(1980\)](#) un facteur de qualité Q permettant de définir l'atténuation Q^{-1} .

Des études expérimentales montrent que l'amortissement intrinsèque η est indépendant de la fréquence caractéristique du chargement, au moins dans le domaine 0 – 25 Hz ([Heisey & Meyer, 1982](#); [Abraham et al., 1997](#)). Pour prendre en compte ce phénomène (non-linéarité dans le comportement, et décroissance des ondes) tout en conservant une loi de comportement linéaire, les paramètres caractérisant le massif sont d'abord idéalisés à l'aide de la réponse obtenue suite à un chargement quasi-statique. Des modèles plus élaborés existent, par exemple à l'aide de la fonction de relaxation introduisant une loi de comportement sous forme intégrale, mais ils sont difficilement exploitables. Dans le cas du modèle de Kelvin-Voigt, les coefficients de Lamé et le module de Young du sol s'expriment en variable complexe ([Maldonado, 2008](#)). Par exemple, le module d'Young complexe \bar{E} est défini par :

$$\bar{E} = E(1 + i\xi\omega) \quad (4.2)$$

avec :

ω : pulsation de l'excitation, ξ : coefficient d'amortissement visqueux.

Le terme d'amortissement intervient dans la partie imaginaire et dépend de la fréquence de l'excitation ; ceci permet d'expliquer l'affaiblissement plus rapide des vibrations de fréquence élevée. Dans la réalité, la boucle d'hystérésis n'est pas elliptique et la loi d'amortissement interne n'est donc pas viscoélastique de type Kelvin-Voigt, ou Maxwell. De plus, chaque modèle ne fait qu'approcher la réalité, puisque, dans le cas d'un sol réel, le comportement observé est non-élastique et l'amortissement suit une loi complexe.

Les facteurs principaux affectant le module d'Young d'un sol et l'amortissement sont :

- l'amplitude des déplacements,
- la valeur moyenne de la contrainte,
- le nombre de cycles de chargement.

Le module d'Young et l'amortissement sont généralement considérés comme variant proportionnellement avec les déplacements ; cela signifie que la boucle d'hystérésis a une surface plus large (donc une dissipation d'énergie plus grande) lorsque les déplacements augmentent. Un amortissement interne de type hystérétique est introduit, ne faisant pas la distinction entre l'amortissement dû au cisaillement et celui dû à la compression. Il est fréquemment

utilisé dans la littérature, parce qu'il correspond aux relevés expérimentaux de manière plus précise que les autres formes d'amortissement. Le module d'Young s'écrira par exemple :

$$\overline{E} = E(1 + i\eta) \quad (4.3)$$

où η est le coefficient d'amortissement hystérétique.

On note que la loi d'amortissement hystérétique est indépendante de la fréquence de l'excitation. Généralement, le coefficient d'amortissement ainsi défini est supposé constant, bien qu'en réalité il dépende de la distance considérée par rapport à l'excitation, puisqu'il est proportionnel à l'amplitude des déplacements.

Une façon de modéliser numériquement l'amortissement consiste à utiliser la formulation proposée par Rayleigh. Cette dernière consiste à construire une matrice d'amortissement $[C]$ proportionnelle aux matrices de masse $[M]$ et de rigidité $[K]$ sous la forme :

$$[C] = \alpha[K] + \beta[M] \quad (4.4)$$

où α et β sont deux constantes définies par l'utilisateur. Le modèle d'amortissement de Rayleigh ne repose sur aucun fondement théorique. La matrice d'amortissement $[C]$ se décompose en une combinaison des matrices $[K]$ et $[M]$ conduisant à une expression de l'amortissement en fonction des coefficients α , β mais aussi de la fréquence du signal (équation 4.5).

$$\eta = 2\xi = \frac{\alpha}{\omega} + \beta\omega \quad (4.5)$$

Il a été démontré que la formulation de Rayleigh est équivalente au modèle rhéologique de Maxwell généralisé (Semblat, 1997) pour les valeurs modérées de coefficient d'amortissement (ξ inférieur à 20%).

Les références bibliographiques ne donnent pas de valeurs pour ces deux coefficients α et β dans le cas du ballast. Dans ce contexte, nous avons établi plusieurs stratégies afin de déterminer ces coefficients :

- la première la plus basique étant de définir les cas extrêmes en fixant un des deux paramètres à zéro en faisant ainsi porter tout l'amortissement soit sur α soit sur β ,
- la seconde en utilisant les paramètres calculés à partir du modèle connu de comportement rhéologique de Maxwell généralisé,
- la troisième en fixant la valeur de α pour une fréquence donnée et en jouant sur la valeur de β afin d'aboutir à un signal modélisé de forme correcte.

Le paramétrage de ces coefficients est décrit dans le paragraphe 4.4.1.5.

4.2 État de l'art sur la modélisation du ballast

Si l'on connaît les pourcentages d'amortissement critique ξ_1 , ξ_2 associés à deux modes propres de la structure, de pulsation ω_1 , ω_2 , on peut estimer α et β à partir des expressions suivantes :

$$\alpha = \frac{2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} (\xi_2 \omega_2 - \xi_1 \omega_1) \quad (4.6)$$

$$\beta = \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_2^2 - \omega_1^2} (\xi_1 \omega_2 - \xi_2 \omega_1) \quad (4.7)$$

Néanmoins aucune étude bibliographique ne donne les amortissements critiques associés à deux modes propres. Une étude dynamique de structures serait nécessaire pour les obtenir.

Il est ainsi préférable de choisir un niveau moyen d'amortissement dans une certaine plage de fréquences.

4.2.1.3 Les différentes méthodes de modélisation continue

Plusieurs méthodes numériques permettent de simuler la propagation des ondes (figure 4.6) :

- Méthode des éléments finis ou FEM (Joly, 1982; Semblat & Brioist, 2000; Semblat & Pecker, 2009),
- Méthode des éléments de frontière ou BEM (Bonnet, 2010),
- Méthode des différences finies (Moczo et al., 2007),
- Méthode des éléments spectraux (Chaljub et al., 2007).

Chaque méthode présente ses avantages et ses inconvénients. Il est souvent intéressant de combiner plusieurs méthodes pour tirer profit de leurs particularités.

La thèse de Maldonado (2008) contient un résumé des méthodes utilisées dans la modélisation de la propagation d'ondes en détaillant les avantages et inconvénients. Andersen et al. (2007) présentent une revue d'ensemble concernant les méthodes FEM/BEM utilisées pour l'étude de la propagation des ondes dans les structures et le sol pour des charges mobiles.

Les deux premières méthodes (FEM et BEM) sont actuellement les plus utilisées pour l'étude des vibrations induites par un trafic ferroviaire.

La méthode des éléments finis est très puissante. Elle permet de modéliser des hétérogénéités et des comportements complexes (Chammas, 2002; Semblat & Dangla, 2005) mais présente deux inconvénients :

1. la réflexion d'ondes parasites sur les frontières du domaine maillé. Une solution simple consiste à prendre un domaine très grand de part et d'autre de l'excitation, de sorte que les déplacements aux frontières du domaine deviennent négligeables, du fait de l'amortissement des ondes. Les méthodes FEM avec frontières ou couches absorbantes permettent

par ailleurs une réduction importante des réflexions parasites ([Semblat et al., 2010](#)) ;

2. la dispersion numérique des ondes qui conduit à une variation artificielle de la vitesse de propagation suivant les paramètres de maillage choisis. La maille doit généralement avoir une taille minimale de l'ordre du dixième de la longueur d'onde pour limiter les phénomènes de dispersion numérique. [Semblat & Brioist \(2000\)](#) ont montré que l'utilisation d'éléments finis à degré d'interpolation élevé permet de réduire de façon significative cette dispersion numérique tout en limitant le volume de calcul.

Pour un massif semi-infini, la profondeur du domaine doit être égale à au moins trois fois la longueur de l'onde de Rayleigh car cette dernière n'a plus d'effet à cette profondeur.

La méthode aux éléments de frontière ou BEM présente l'avantage de modéliser aisément la propagation des ondes dans un milieu infini ou semi-infini et résout le problème aux interfaces de milieux homogènes. Cette méthode est fondée sur la résolution d'équations intégrales à la frontière du domaine réduisant ainsi le nombre de degrés de liberté ainsi que le maillage.

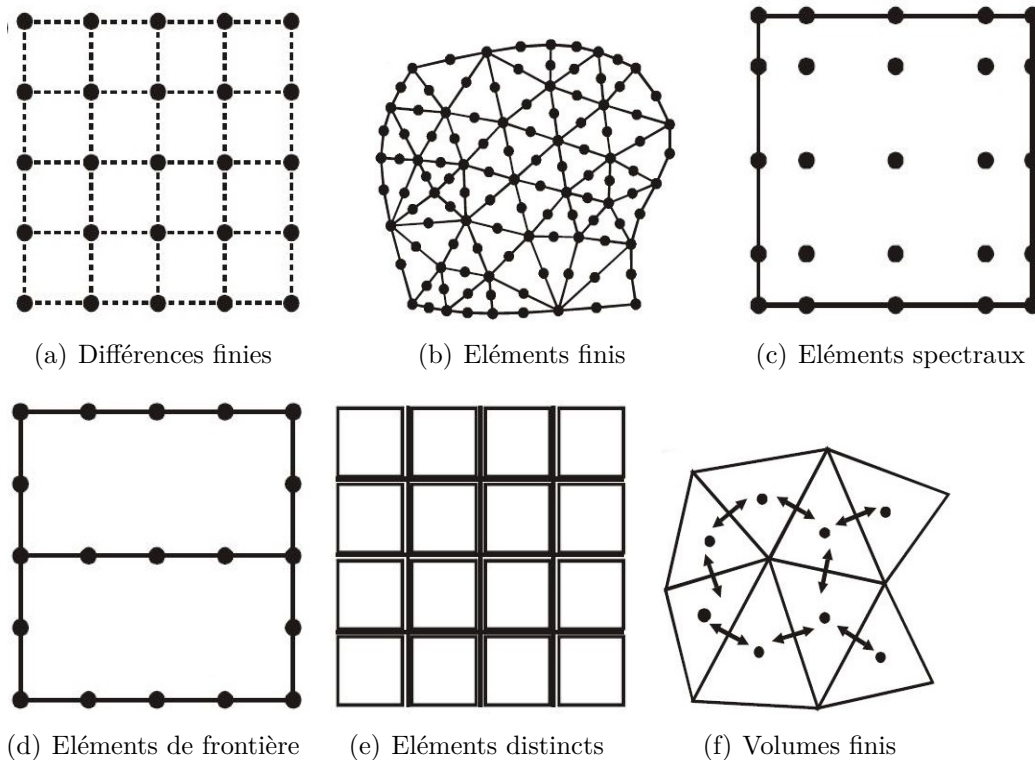


Figure 4.6 – Divers maillages de modèles numériques de propagation d'ondes sismiques ([Semblat, 2008](#))

4.2 État de l'art sur la modélisation du ballast

4.2.1.4 Travaux de modélisations du ballast par éléments finis

Certains travaux considèrent le ballast comme un milieu continu à comportement élastique linéaire. Cette loi de comportement pour décrire le ballast ne reflète pas la réalité d'un milieu discontinu. Nous souhaitons néanmoins démontrer les limites d'un calcul continu en prenant les valeurs des paramètres de modélisation de la littérature et en utilisant les coefficients obtenus à partir du modèle de Maxwell généralisé (Semblat et al., 2011). Les paramètres du modèle sont la densité, le module d'Young, le coefficient de Poisson, et l'amortissement dépendant des deux coefficients des matrices de masse (β) et de rigidité (α).

Bodin (2001) modélise la voie ferrée par un modèle continu au moyen de zones compactées sous traverse à forte rigidité et non compactées entre deux traverses à faible rigidité. Une étude paramétrique sur les coefficients des matrices d'amortissement et de rigidité du ballast a été réalisée à partir des déplacements verticaux mesurés sur une traverse d'une structure expérimentale.

Les travaux de Zhai et al. (2004) ont consisté à modéliser la voie ferrée par un ensemble de systèmes masses-ressort-amortisseur pour chaque couche de la voie.

L'étude de Payeur et al. (2013) a pour but de modéliser par éléments finis avec des hypothèses de comportement élastique linéaire une structure ferroviaire comprenant un remblai renforcé. Une impulsion est générée à son sommet et une étude paramétrique est réalisée en condition axysymétrique.

Les travaux de Abdelkrim et al. (2004) permettent de simuler le comportement à long terme d'une voie ferrée soumise à une charge de trafic et de prévoir l'évolution de son tassement résiduel. Une loi de comportement élastique cyclique du ballast est définie en générant des contraintes similaires au trafic ferroviaire.

La thèse de Al Shaer, Ali (2005) permet de modéliser par la méthode des éléments finis une structure ferrée avec des comportements élastiques linéaires pour chaque couche en vue d'étudier une loi de tassement vertical pour un grand nombre de cycle. Al Shaer, Ali (2005) précise les paramètres choisis pour modéliser un plot de faible dimension en comparant deux codes (CESAR LCPC et Abaqus).

Esvelde (2001) a réalisé une modélisation 2D de voie avec ses différents composants (rail, patin du rail, traverse) afin de montrer l'influence de certains paramètres sur le comportement de la structure (réceptance de la voie).

Galvin & Dominguez (2008) réalisent une modélisation 3D comparative entre les éléments finis et les éléments de frontière pour étudier le comporte-

ment de la voie ferrée. Ils précisent les valeurs d'amortissement.

La thèse de [Nguyen \(2002\)](#) porte sur la modélisation du comportement d'une voie décrite avec des comportements linéaires et non-linéaires en fonction d'une charge mobile.

Les travaux de [Paderno \(2010\)](#) consistent à comprendre la dégradation du ballast suite au processus de bourrage. Un modèle aux éléments finis a été réalisé pour simuler les tassements sous trafic afin de comprendre ces phénomènes. Chiara Paderno fait une synthèse des paramètres caractérisant le ballast. Elle trouve dans la thèse de [Fortunato \(2005\)](#) des références de module d'élasticité pour un ballast neuf de 270 à 630 MPa¹ Elle donne des valeurs de perméabilité (>25 mm/s), d'indice de vides ($> 0,7$), de constante diélectrique pour un ballast neuf ($\varepsilon_r = 3$) mais aussi pour un ballast dégradé ($\varepsilon_r = 3,3$).

[Kouroussis \(2009\)](#) réalise une analyse paramétrique d'une modélisation de la voie. Le module du ballast pris égal à 25 MN/m peut varier suivant la rigidité du ballast (pour différents auteurs les valeurs varient de 12 à 190 MN/m).

[Sun & Dhanasekar \(2000\)](#) ont modélisé le ballast avec un ensemble d'élément discrets constitués d'une masse et d'un amortissement intrinsèque. Il prend une valeur de 31,6 MN/m pour la raideur du ballast et de 21,8 kNs/m comme amortissement.

L'analyse par intégration directe dans le temps (module DYNI de CESAR-LCPC) a été utilisée notamment pour l'analyse de déformations permanentes des voies ferrées ([Al Shaer, Ali, 2005](#)) ainsi que pour l'interprétation d'essais au FWD (Thèse de [Broutin \(2011\)](#)). Un outil d'aide au dimensionnement des voies ferrées a été développé à la SNCF et à l'Ecole centrale de Paris. Il permet d'étudier le comportement dynamique (déflexions de la voie en fonction du trafic et des défauts de la voie et des roues ([Saussine, 2004](#))). Le maillage de cette modélisation est concentré à l'aplomb du véhicule roulant pour diminuer le temps de calcul.

[Combe \(2002\)](#) a réalisé un chargement cyclique sur un modèle bidimensionnel de ballast de chemin de fer basé sur le principe des matériaux de Schneedeli, comportant un empilement de prismes pentagonaux. Le dispositif expérimental est constitué d'un cadre rectangulaire en aluminium sur lequel est fixé un vérin de 4 kN appliquant une charge pseudostatique (≤ 2 Hz) sur un blochet reposant sur un lit de ballast pentagonaux. La fréquence de sollicitation et la qualité de la sous-couche sont des paramètres importants dans l'évolution du tassement du ballast. L'augmentation de la fréquence se traduit par des tassements plus importants ([Bodin, 2001](#)). ‘

1. 1 MPa = 1000 kN/m²

4.2 État de l’art sur la modélisation du ballast

[SaintLaurent \(2008\)](#) a fait une synthèse des outils de modélisation de chaussées. Les différents modules utiles pour la modélisation de la structure ferroviaire avec CESAR-LCPC sont décrits dans ce rapport.

La synthèse des paramètres décrits dans la littérature est présentée dans le tableau de l’annexe [C.1](#) et la synthèse des méthodes de modélisation du ballast dans le tableau [4.1](#).

Tableau 4.1 – Synthèse bibliographique des méthodes de modélisation du ballast

Sources bibliographiques	Type modélisation
Zhai et al. (2004)	Masse Ressort Amortissement
Abdelkrim et al. (2004)	Loi de comportement
Payeur et al. (2013)	FEM
Al Shaer, Ali (2005)	FEM
Galvin & Dominguez (2008)	FEM/BEM 3D
Nguyen (2002)	Loi de comportement
Guérin (1996)	Modélisation discrète
Fortunato (2005)	
Esveld (2001)	Masse Ressort Amortisseur
Kaewunruen & Remennikov (2006)	Masse Ressort Amortissement
Kouroussis (2009)	FEM
Sun & Dhanasekar (2000)	Masse Ressort Amortisseur
Paderno (2010)	Loi de comportement

4.2.2 Modélisation discrète

La modélisation discrète considère un assemblage d’éléments discrets rigides ou peu déformables en contact les uns avec les autres. Ces modèles car ils considèrent le comportement du milieu à l’échelle des particules qui le constituent. Cette représentation reflète la réalité d’un tel milieu car il est possible d’intégrer des particules de forme et dimension variables.

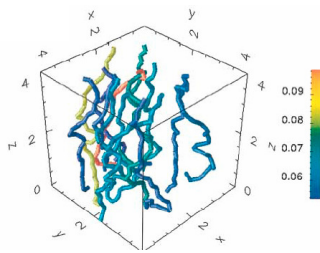
4.2.2.1 Chaînes de force

[Miksic \(2008\)](#); [Huillard \(2011\)](#) ont étudié la propagation d’ondes acoustiques dans des empilements granulaires non cohésifs. Pour résumer, trois facteurs interviennent dans les milieux granulaires pour expliquer le comportement de ces matériaux :

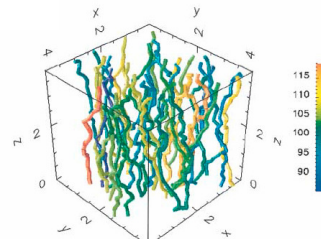
1. **le désordre du réseau des contacts** : l’empilement des grains est aléatoire et conduit certains grains voisins à ne pas se toucher. Une

force extérieure appliquée sur un réseau de grains même ordonnés peut conduire à des contacts désordonnés. Des chaînes de force se créent avec un petit nombre de contacts, ces derniers supportant la majeure partie de la force (figure 4.7). Dans la vie quotidienne, l'empilement de bûches en bois est un cas parlant de ce phénomène. En effet, il n'est pas a priori plus difficile de retirer une bûche en bas du tas qu'en haut alors qu'elle est censée encaisser le poids de toutes les autres situées au dessus. Cela dépend des contacts entre les bûches.

2. **la loi de contact entre les grains ou loi de Hertz.** Cette loi non-linéaire est une loi de puissance entre la déformation des grains et la force appliquée. Elle est basée sur un empilement de billes en contact considérées comme une succession de masses-ressorts en série. [Johnson et al. \(2000\)](#) ont étudié l'évolution des chaînes de forces dans un empilement tridimensionnel pour différentes forces extérieures appliquées. Ils concluent que pour de faibles forces, il apparaît un petit nombre de chemins tortueux ou chaînes de force. Dans le cas d'une force élevée, il apparaît de nouveaux contacts conduisant à une distribution spatiale des chaînes de force plus homogène conférant ainsi au ballast de très bonnes caractéristiques mécaniques.
3. **l'empilement non cohésif des particules** rend complexe la compréhension du compactage d'un matériau granulaire. En effet, il est difficile de compacter un ballast neuf étant donné que les granulats sont facilement mobilisables même après un réarrangement des éléments. Le trafic ferroviaire conduit à fracturer les granulats. Cela crée ainsi des fines qui amène le matériau à être plus cohésif.



(a) 21 kPa



(b) 100 MPa

Figure 4.7 – Simulation numérique des chaînes de forces d'un empilement de billes de verre soumis à une contrainte statique ([Makse et al., 2000](#))

4.2 État de l'art sur la modélisation du ballast

4.2.2.2 Les différentes approches

La modélisation discrète est basée sur les lois de mécanique classique liant les efforts aux déplacements. Les deux grandes familles de méthodes de calcul (figure 4.8) sont les suivantes :

- **méthodes de type contact unilatéral**² : il s'agit de la méthode historique des physiciens décrivant un amas de sphères. La force de contact est exprimée par les distances entre les centres de chaque sphère d_n . À chaque pas de temps, la force normale perpendiculaire au contact décrit une fonction au sens mathématique. Quand la distance est minimale, les objets se touchent et sont en contact et on peut avoir une infinité de valeurs d'effort. On ne considère ainsi que le contact unilatéral entre les sphères et on parle de contact unilatéral de [Signorini \(1933\)](#). Ce modèle statique sans frottement moyenne des phénomènes micro-physiques d'interface. Il n'existe pas dans ce cas de valeurs négatives de la distance entre deux sphères correspondant à l'interpénétration des sphères ([Moreau, 1966](#); [Jean & Moreau, 1992](#); [Jean, 1999](#)). Cette fonction est une droite tendant vers l'infini pour une valeur de distance nulle (figure 4.8). Cette méthode est à la base de l'approche A-CD², développée sous le logiciel Start3D, pour la modélisation discrète du ballast (chapitre 4.5.1, [Dimnet \(2002\)](#)),
- **méthodes représentant les efforts avec des systèmes masses-ressorts-amortisseurs** [Cundall & Strack \(1979\)](#); [Hertz \(1882\)](#) où les ressorts permettent de décrire le déplacement des éléments. Dans ce cas, les objets peuvent s'interpénétrer même si le ressort pénalise l'interpénétration par l'existence d'un potentiel très fort. Cette analyse convexe du point de Selle (point issu du produit cartésien de deux ensembles, situé au maximum de l'un et au minimum de l'autre) est une fonction linéaire avec des conditions de Signorini régularisées (la force augmente quand $d_n < 0$ avec une pente vers la gauche). Si la distance est inférieure à celle correspondant au contact minimal, la fonction suit une droite régularisée par le ressort, la force augmente ainsi pour des valeurs de d_n négatives.

Pour le frottement, il est possible d'intégrer de nombreux types de lois de frottement.

Le chapitre 4.2.2.3 présente les travaux qui décrivent notamment les différentes méthodes de la simulation discrète.

2. Deux solides distincts sont dits en contact lorsqu'ils partagent une surface commune qui est une partie de leur frontière. Traiter le contact unilatéral consiste à empêcher que l'un des solides ne "traverse" l'autre.

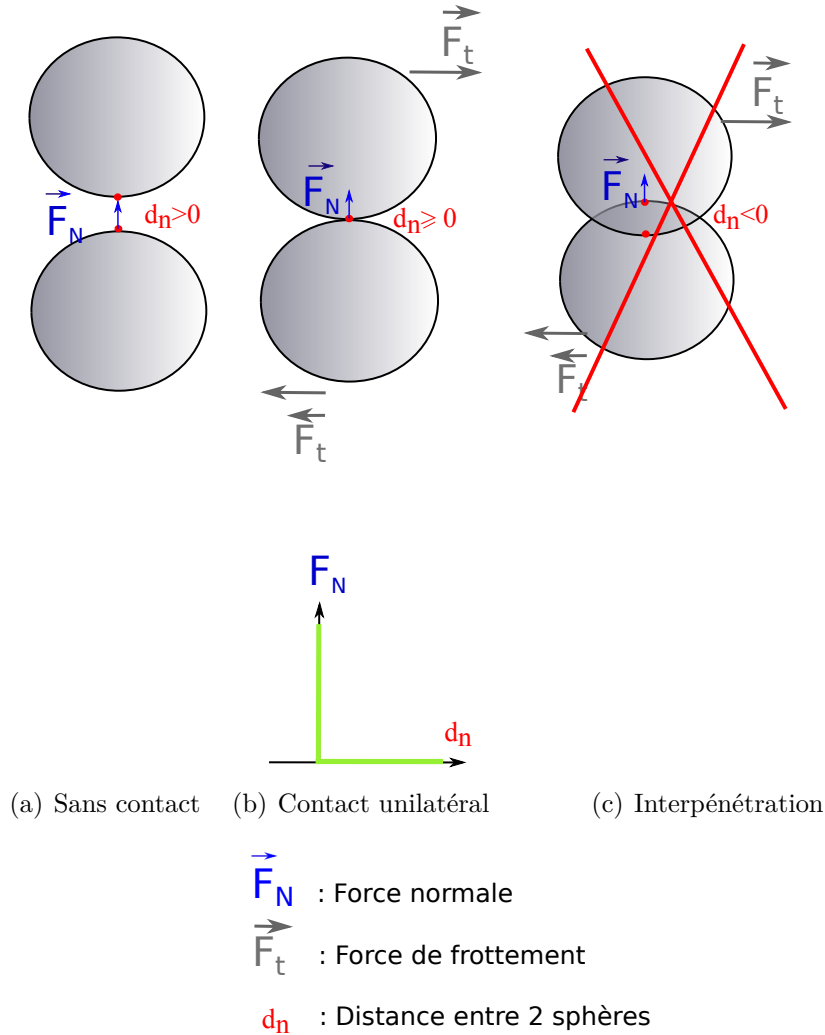


Figure 4.8 – Différentes méthodes de modélisation numérique discrète (sur l'exemple de sphères)

L'inconvénient de ces simulations réside dans la complexité du modèle avec un nombre important de paramètres et la nécessité d'inclure un pas de temps suffisamment petit devant la durée du choc. Cela conduit à des temps de calcul élevés.

Les lois appliquées dans les modélisations discrètes sont généralement simples : lois de contacts avec des contacts unilatéraux entre les grains et loi de frottement sec de Coulomb (réaction tangentielle s'opposant au glissement),

4.2 État de l'art sur la modélisation du ballast

lois de chocs sur un intervalle de temps très court (loi de restitution de Newton) en mettant en relation la vitesse avant (U_N^+) et après (U_N^-) le choc avec le coefficient de restitution e de la façon suivante : $U_N^+ = -eU_N^-$.

La présence d'aspérités susceptibles de se déformer au contact peut être prise en compte avec un comportement différent où la réaction peut être proportionnelle à l'interstice qui peut ainsi prendre des valeurs négatives pour caractériser une interpénétration.

Les modèles les plus simples consistent à simuler le ballast par un ensemble d'éléments circulaires ou sphériques monodimensionnels. Ces derniers reflètent plus une approche théorique que réelle étant donné que les granulats de ballast présentent des formes variables (Ricci et al., 2005; Suiker et al., 2005).

4.2.2.3 Travaux de modélisation discrète du ballast

Les lois qui décrivent un milieu granulaire dans les cas unidimensionnel et tridimensionnel sont décrites dans la thèse de Al Shaer, Ali (2005) et dans celle de Saussine (2004).

Elles reflètent :

- des cas unidimensionnels avec un nombre fini de particules identiques en contact, soumises à un choc (figure 4.9) ; la solution présente une partie linéaire, une partie non-linéaire et une partie amortie,
- des cas tridimensionnels avec une loi de comportement s'écrivant à l'aide de la décomposition spectrale.

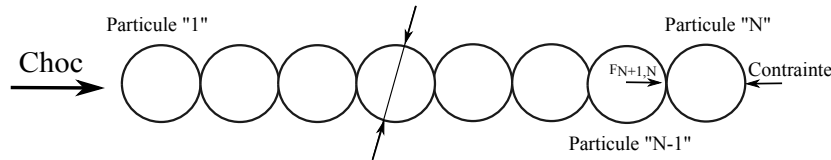


Figure 4.9 – Problème granulaire 1D (Al Shaer, Ali, 2005)

Certains auteurs considèrent le ballast comme une masse oscillante (méthode DM, Ahlbeck et al. (1975); Knothe & Grassie (1993); Herrmann & Luding (1998); Kouroussis (2009)). La masse oscillante de chaque bloc de ballast, au droit de chaque traverse, est calculée par :

$$m_b = l_s h_b \rho_b (l_e + h_b) \tan \alpha \quad (4.8)$$

où ρ_b est la masse volumique apparente du ballast, les autres termes étant des données géométriques relatives aux blocs de ballast.

La thèse de [Guérin \(1996\)](#) présente une modélisation discrète d'une éprouvette de l'essai microballast (hauteur de 100 mm et section de 500*500 mm²) au moyen de sphères de 7 mm avec une liaison élastique linéaire entre les grains ou contacts unilatéraux (deux lois de contacts : matrice de raideur indépendante de la force intergranulaire et loi de Hertz-Mindlin où la rigidité dépend de la force de contact). Cette thèse met également en évidence une loi de tassement du ballast liant l'incrément du tassement à la déflexion du blochet.

La thèse de [Oviedo Marlot, \(2001\)](#) met en évidence la déformation du ballast ferroviaire au cours d'un essai de bourrage en considérant chaque grain de ballast avec des polygones en contact. Cette modélisation est une application du banc d'essai "bouba" (Annexe [A.7.1](#)).

La thèse de [Saussine \(2004\)](#) prend en compte la méthode de dynamique des contacts à partir de la formulation de [Jean & Moreau \(1992\)](#). Il considère des échantillons représentant une coupe transversale de voie ballastée constituée d'un assemblage de polygones sus-jacents à une sous couche pouvant se déformer (ressort visco élastiques sous les polygones). Ces échantillons sont ensuite soumis à des chargements cycliques verticaux et transversaux à une fréquence de 20 Hz. Les temps de calcul sont longs (1000 cycles à 20 Hz correspondent à une durée de 24 h). Il modélise une couche mince de ballast obtenue par pluviométrie en étudiant les chaînons de force et l'influence des contacts linéiques ainsi que la résistance de la voie à des efforts verticaux et transversaux, un talus de ballast en retirant la paroi verticale de façon lente ou brusque, un tambour tournant pour étudier les écoulements du ballast.

La thèse de [Dimnet \(2002\)](#) comprend le développement de la méthode de calcul A-CD² utile pour modéliser la dynamique des contacts.

Les articles [Gautier et al. \(2008\)](#); [Gautier \(2009\)](#) permettent de considérer les problèmes mécaniques dans le domaine ferroviaire et en particulier de comprendre le comportement de l'infrastructure ferroviaire à partir de modèles avec une approche de milieux continus et une approche de milieux discrets.

La thèse de [Karrech \(2007\)](#) décrit un modèle discret. Il intègre une étude paramétrique des données d'entrée du modèle en étudiant la réponse de l'échantillon. Il met en évidence l'influence des paramètres (réarrangement des particules, usure et écoulement) sur la vitesse de tassement du ballast.

La thèse de [Lecheheb \(2010\)](#) fait une synthèse des travaux de modélisation préalablement à son étude de simulation d'un rail sur appui continu.

4.3 Essais de référence

4.3.1 Présentation de l'expérimentation

Un plot expérimental en ballast de faible dimension (1x1, épaisseurs 15 cm et 30 cm), est mis en œuvre sur une double plaque métallique (dispositif utilisé pour la station d'impact pendulaire - [Dimnet et al. \(2013\)](#)) en appui sur un support rigide en béton par l'intermédiaire d'un lit de sable de 15 mm (figures [4.10](#) et [4.11](#)).

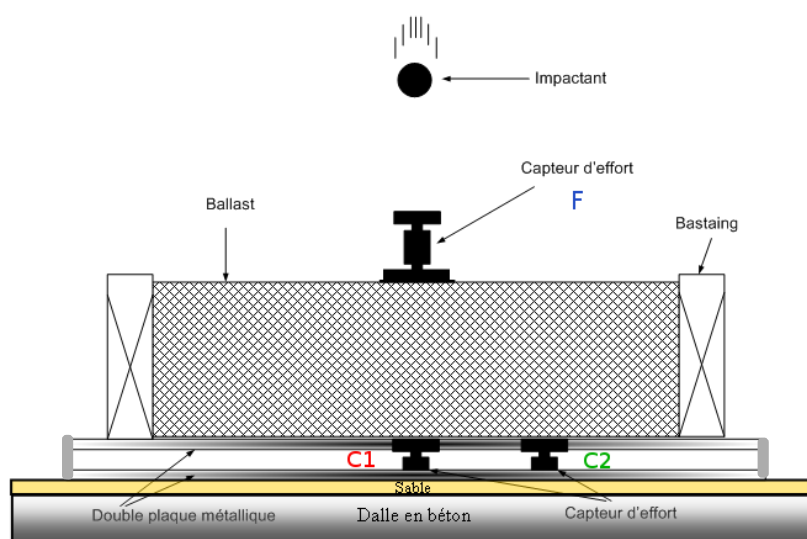
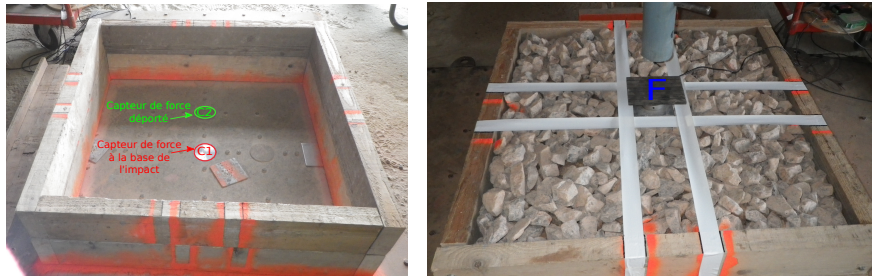


Figure 4.10 – Schéma du plot ballasté de faible dimension

Des sollicitations faiblement énergétiques sont exercées à la surface du ballast au moyen de la chute d'une masse. Cette source est suffisamment énergétique pour quantifier la fonction de transfert en étudiant la force appliquée et celle mesurée sous la couche.

Un tube en PVC est utilisé pour guider la masse en chute. Ce tube est percé à différentes hauteurs pour exercer des sollicitations à niveaux d'énergie variables. Ce système guide la masse sur la plaque du capteur en surface et permet un test reproductible.

Trois couches de ballast compacté et une couche de ballast foisonné ont été étudiées pour deux épaisseurs de ballast (15 et 30 cm). Ce ballast présente une granulométrie 31,5/50 de la carrière Vignats, caractéristiques décrites en annexe [B.1.4.1](#) à la page [203](#)). Pour chaque essai, quatre hauteurs de chute de masse sont étudiées (30, 50, 70 et 100 cm).



(a) Cadre en bois du plot expérimental avec les deux capteurs de force à la base du ballast (b) Plot expérimental avec 30 cm de ballast

Figure 4.11 – Dispositif expérimental du plot de faible dimension

Le dispositif expérimental (figures 4.10 et 4.12) est constitué de capteurs placés en entrée et en sortie de la couche de ballast et insérés entre deux plaques métalliques pour mesurer les forces exercées sur plusieurs grains de ballast :

- un capteur de force d'étendue de mesure de 10 kN installé à la surface du ballast entre deux plaques (figure 4.13) pour mesurer l'effort d'impact généré en entrée répartissant ainsi l'effort sur plusieurs éléments de ballast avec une surface d'appui de 169 cm^2 (plaque carrée de 130 mm de côté et de 20 mm d'épaisseur) ; l'impactant est réceptionné sur une plaque circulaire de 100 mm de diamètre et de 15 mm d'épaisseur (figure 4.13),
- deux capteurs d'efforts d'étendue de mesure de 2 kN distants de 25 cm insérés dans une double plaque métallique à la sortie du ballast sur une surface de contact avec le ballast de $78,54 \text{ cm}^2$ (plaque circulaire de 100 mm de diamètre).

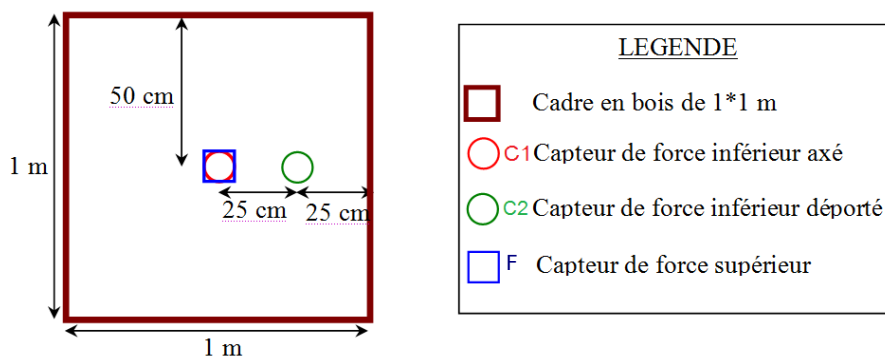
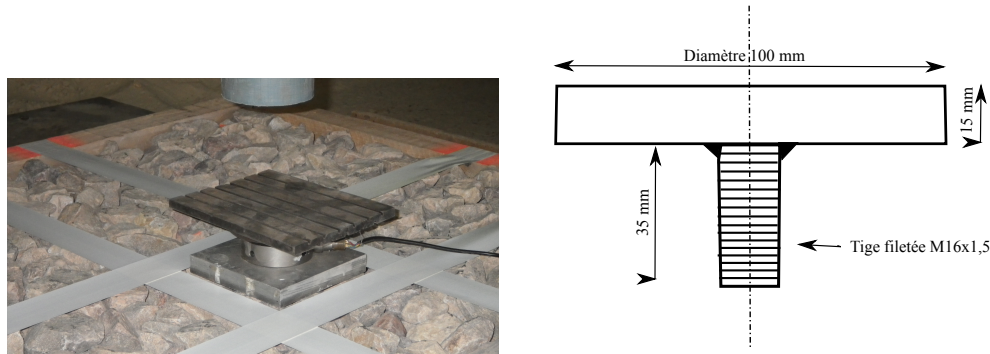


Figure 4.12 – Vue de dessus du plot de faible dimension

4.3 Essais de référence



(a) Capteur de force supérieur F avec élastomère (b) Plaque de transmission vissée dans le capteur de force

Figure 4.13 – Ensemble capteur d’effort, plaque de transmission d’effort et élastomère.

Un élastomère est installé sur la plaque supérieure du capteur réceptionnant l’impactant (figure 4.13) pour rendre le choc mou et ainsi permettre au capteur d’effort de pouvoir répondre ; les premiers essais, sans élastomère, ne donnant aucun résultat. En effet, le capteur de force n’avait pas un temps de réponse suffisamment rapide du fait du choc dur. Dans ce contexte, l’impact présente une bande fréquentielle peu visible. La masse et les dimensions utiles à la modélisation discrète sont définies dans le tableau 4.2.

Un étalonnage des capteurs de force a été réalisé au préalable des essais. La figure 4.14 présente les coefficients des droites de régression des courbes d’étalonnage.

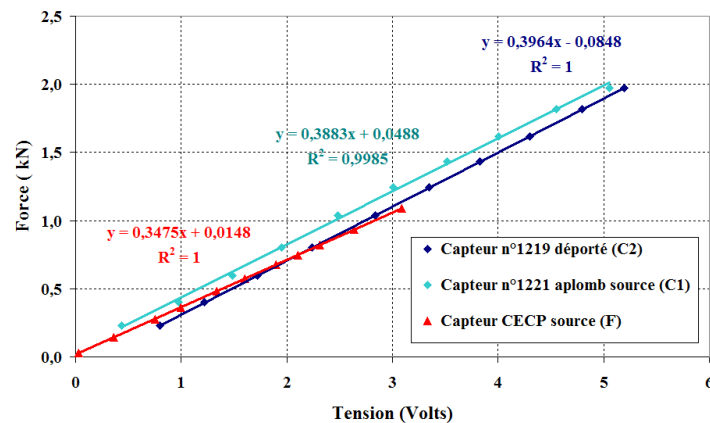


Figure 4.14 – Courbes d’étalonnage des capteurs d’effort

4 Simulation d'une couche de ballast

Tableau 4.2 – Masse et dimensions des éléments utiles à la modélisation discrète

Élément	Masse (kg)	Dimension (mm)
Capteur de force supérieur avec ses deux plaques	2,565	plaque inférieure L x l x e=130 x 130 x 20 plaque supérieure $\phi=100$, e=15
Accéléromètre dans double plaque creuse + élastomère	4,65	-
Impactant (boule de pétanque)	0,71	$\phi = 73,9$
Élastomère	0,32	-

Le remplissage du cadre en bois a été effectué de façon manuelle avec un excédent de matériau pour atteindre l'épaisseur désirée. Le compactage du ballast est ensuite réalisé suivant les deux étapes suivantes (figure 4.15) :

1. réarrangement des éléments de ballast au moyen d'un marteau pneumatique muni d'une plaque carrée de 15 cm de côté,
2. compactage de la surface au moyen d'une plaque vibrante et d'une plaque en bois afin de répartir l'impact pour assurer un état de surface plan et éviter de casser les éléments de ballast.



(a) Réarrangements des granulats de ballast au marteau pneumatique (b) Compactage des granulats de ballast à la plaque vibrante sur une planche

Figure 4.15 – Mise en œuvre du ballast du plot expérimental de faible dimension

4.3.2 Résultats des essais de validation

4.3.2.1 Données de l'expérimentation

Une pesée du matériau est faite au préalable pour chaque modalité afin de déterminer la densité du ballast mis en œuvre. Une estimation de la densité de ce plot a été faite en pesant le matériau. Une masse volumique de $0,244 \text{ t/m}^3$ pour un volume de $0,162 \text{ m}^3$ conduit à une masse volumique de $1,51 \text{ t/m}^3$ alors que le plot compacté présente une densité de $1,63 \text{ t/m}^3$. Les résultats figurent dans le tableau 4.3.

4.3 Essais de référence

Tableau 4.3 – Synthèse des paramètres des essais sur plot de faible dimension

Épaisseur du ballast (cm)	État de serrage	Fixation plaque sur ballast	<i>h</i>	<i>e</i>				<i>m</i>	<i>V</i>	<i>ρ</i>
15 cm	Foisonné	Posée	0,3	3	3	6	0,244	0,162	1,51	
			0,5	1	5	3				
			0,7	0	0	3				
			1	1	3	2				
	Compacté	Posée	0,3	1	1	0	0,280	0,172	1,63	
			0,5	1	2	2				
			0,7	1	3	1				
			1	0	1	4				
30 cm	Foisonné	Posée	0,3	1	4	1	0,478	0,299	1,60	
			0,5	3	1	2				
			0,7	0	0	0				
			1	2	2	0				
	Compacté	Posée	0,3	2	1	1	0,518	0,310	1,67	
			0,5	2	2	1				
			0,7	0	0	3				
			1	0	0	0				
	Compacté	Scellée	0,3	1	1	0	0,518	0,291	1,78	
			0,5	2	1	1				
			0,7	2	3	4				
			1	2	1	0				
	Compacté	Posée	0,3	1	0	4	0,518	0,312	1,66	
			0,5	0	5	0				
			0,7	2	1	1				
			1	1	1	1				
	Compacté	Scellée	0,3	1	1	1	0,518	0,295	1,76	
			0,5	0	0	1				
			0,7	1	1	1				
			1	2	1	0				
	Compacté	Posée	0,3	1	1	2	0,518	0,309	1,68	
			0,5	1	1	2				
			0,7	1	1	1				
			1	1	1	2				
Pour chaque hauteur de chute, trois essais ont été réalisés.										
<i>h</i> : hauteur de chute (m) <i>e</i> : enfoncement de la plaque après les essais (cm) <i>m</i> : pesée du ballast (t) <i>V</i> : volume (m³) <i>ρ</i> : masse volumique (t/m³)										

Les premiers essais de chute de masse indiquent que la plaque posée sur le ballast s'enfonce dans le ballast et remanie le matériau en surface, à partir d'une hauteur de chute de 50 cm, indiquant des non-linéarités locales. Afin de garantir les mêmes conditions expérimentales entre les différents essais de plaque « posée », un réarrangement des éléments entre les essais a été opéré à la surface avec une fourche, afin de remettre à niveau l'état de surface et faire une mesure de hauteur (impactant-ballast) avant et après l'essai. Les mesures avec le scellement de la plaque ne créent a priori pas ce type de problème et ne nécessitent donc pas de remaniement entre essais.

Plusieurs modalités d'essais sont réalisées afin d'étudier :

- la reproductibilité³ dans un plot de ballast compacté (3 modalités compacté avec scellement (au plâtre) ou non de la plaque),
- l'effet de l'épaisseur de ballast sur l'amortissement du signal (15 et 30 cm),
- l'effet du scellement entre la plaque sollicitée et le ballast (posée et scellée au plâtre) ; cette modalité a pour objet de moyennner la mesure et d'être moins influencée par les contacts plaque/ballast.
- l'effet de l'état de serrage du ballast (foisonné ou compacté).

Une mesure de hauteur est réalisée avant et après chaque essai afin d'estimer l'enfoncement de la plaque pendant la sollicitation dans le ballast. Cette mesure est indicative car elle est déportée par rapport au centre de la plaque de sollicitation (figure 4.16).



Figure 4.16 – Mesure de l'enfoncement de la plaque dans le ballast à chaque essai

3. les essais de répétabilité consistent à comparer des essais de chute de masse sur une même épaisseur de ballast alors que les essais de reproductibilité consistent à comparer des essais sur des épaisseurs de ballast remises en œuvre

4.3 Essais de référence

La force mesurée par chaque capteur est enregistrée pour toutes les modalités au moyen d'une carte d'acquisition National Instrument couplée au logiciel d'acquisition DasyLab. Les données ASCII sont ensuite traitées sous Matlab. La fréquence d'échantillonnage définie pendant les essais est de 10 kHz, ce qui fait une mesure toutes les 0,1 ms.

Le traitement des données sous le logiciel Matlab a été effectué en 3 étapes :

- sélection d'un signal restreint au moyen de curseurs pour supprimer les artefacts rencontrés pendant les essais ou les rebonds postérieurs au premier choc,
- suppression du décalage du zéro (offset des voies) visible sur les enregistrements des capteurs de force,
- détection des maxima du capteur de la source et du capteur déporté afin de déterminer le début et la fin du choc par un seuil équivalent à 10% des valeurs maximales. À partir de ces deux limites, cinq échantillons au début et dix à la fin sont comptabilisés dans l'enregistrement restreint ce qui fait environ une quarantaine de points par enregistrement, soit une durée de 4 ms.

Les données obtenues expérimentalement sont intégrées en entrée des logiciels de modélisation dans les paragraphes 4.4 et 4.5.

4.3.2.2 Décroissance d'amplitude du ballast

En prenant l'exemple de la figure 4.17 avec une épaisseur de 15 cm de ballast, l'amortissement atteint 71 % à l'aplomb de la source et 98 % sur le capteur déporté à 25 cm de l'aplomb de la source. Le signal est ainsi fortement amorti sur le capteur déporté. Dans ce contexte nous privilégions d'étudier principalement les données du capteur C1 à l'aplomb de la source.

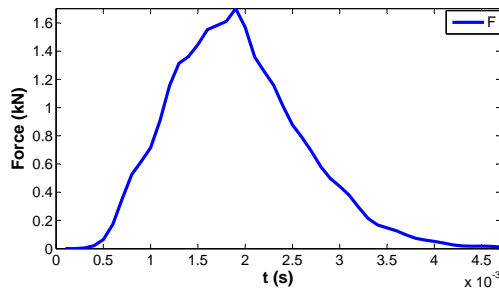
Différents auteurs (Tatsuoka et al., 1978; Hardin et al., 1994; Li et al., 2013) proposent un amortissement à partir du rapport d'une grandeur sur la grandeur maximale (équations 4.9). Dans notre cas, nous comparons la valeur mesurée et calculée au point C1 ($C1_{exp}$) à celle mesurée en entrée du ballast (F_{exp}).

$$D_{exp} = G \left(\frac{C1_{exp}}{F_{exp}} \right) \quad (4.9)$$

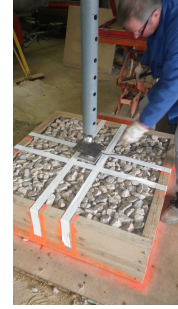
L'amortissement du signal mesuré correspond au rapport entre la moyenne des maxima des capteurs F et C1 (figure 4.12). Les résultats résultent de la moyenne et de l'écartype de 12 à 36 essais. Ils figurent sur le graphe 4.18.

Il apparaît que le ballast amortit d'autant plus que l'épaisseur de ballast est conséquente. L'amortissement atteint une valeur moyenne de $72,5 \pm 14$ % avec 15 cm et de 85 ± 2 % avec 30 cm de ballast compacté.

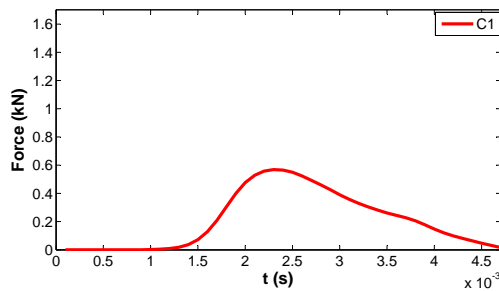
4 Simulation d'une couche de ballast



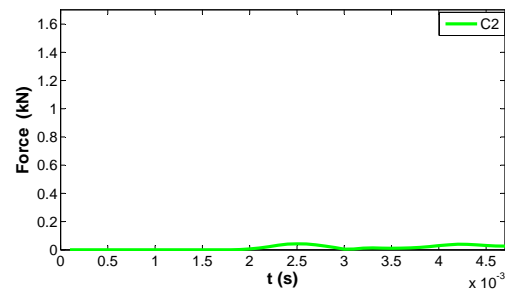
(a) Capteur à la source



(b) Photographie du dispositif



(c) Capteur à l'aplomb de la source



(d) Capteur déporté

Figure 4.17 – Exemple d'essai sur un plot de 15 cm de ballast foisonné - Hauteur de chute de 30 cm

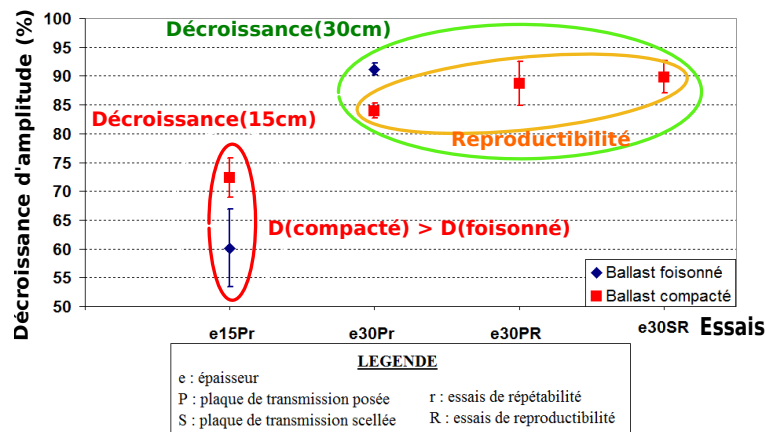


Figure 4.18 – Synthèse des résultats expérimentaux d'amortissement du ballast(F-C1)

En comparant les deux états de serrage du ballast sur les deux épaisseurs de ballast, les résultats montrent un amortissement plus fort dans le cas foisonné avec 15 cm alors qu'avec 30 cm de ballast, l'amortissement est plus conséquent dans le cas compacté. Des phénomènes complexes interviennent

4.3 Essais de référence

sur la propagation dans la transmission des efforts.

Avec une épaisseur de 30 cm de ballast les écart-types de mesure sont plus faibles. Néanmoins une variabilité de la mesure reste conséquente lorsque l'on fait des essais de reproductibilité. Ces essais ont pour conséquence de modifier les contacts entre les éléments de ballast conduisant à des chemins préférentiels aléatoires indépendant de l'état de serrage.

4.3.2.3 Vitesse de propagation du ballast

Le traitement des graphes temporels des trois capteurs de force permet de définir la vitesse de propagation dans le ballast. En effet, le temps mis par les chaînons de force (figure 4.19 et tableau 4.4) entre les différents capteurs positionnés à une distance connue conduit à une vitesse de propagation comprise entre 90 ± 8 m/s et 220 ± 15 m/s suivant la modalité (figure 4.20 avec la relation $V = \frac{d}{t}$). La vitesse obtenue sur les planches expérimentales à l'échelle 1 présentent une vitesse supérieure de 100 m/s aux vitesses des modèles expérimentaux de faible dimension.

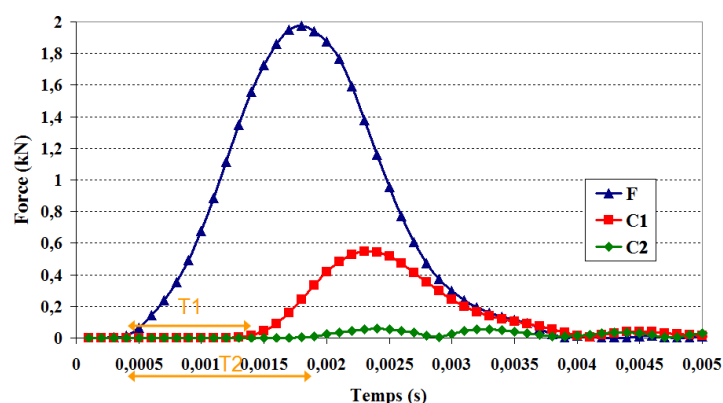


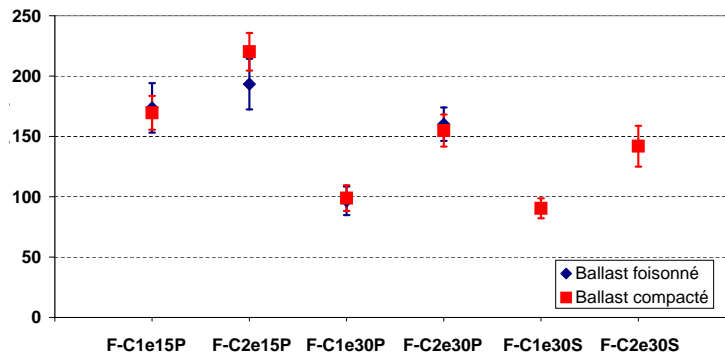
Figure 4.19 – Exemple de calcul de vitesse de propagation dans le ballast compacté
- Hauteur de chute de 30 cm

Tableau 4.4 – Récapitulatif des vitesses de propagation calculées dans le ballast foisonné et compacté

Capteurs de force	Distance (cm)	Temps (s)	Vitesse (m/s)
C1-F	15	T1	de 90 ± 8 à 170 ± 14
C2-F	29,15	T2	de 140 ± 17 à 220 ± 15

En considérant une vitesse de propagation des ondes de compression de 220 m/s, l'onde a parcouru pendant le choc une distance de 0,8 m ce qui

4 Simulation d'une couche de ballast



LEGENDE	
F-C1	: capteurs F et C1 pris en compte pour le calcul de vitesse
F-C2	: capteurs F et C2 pris en compte pour le calcul de vitesse
E15	: épaisseur de 15 cm de ballast
E30	: épaisseur de 30 cm de ballast
P	: plaque posée en surface sur le ballast
S	: plaque scellée en surface sur le ballast

Figure 4.20 – Synthèse des vitesses de propagation dans le ballast - Hauteur de chute de 30 cm - Épaisseur 15 et 30 cm de ballast

indique des réflexions sur le fond du plot qui se trouve à 15 ou 30 cm. Il est important de déterminer la distance parcourue par l'onde sur la fenêtre temporelle du choc pour comprendre les phénomènes et savoir si des réflexions peuvent être visibles sur les enregistrements. Ce constat peut expliquer une différence de vitesse de propagation entre les deux épaisseurs (15 et 30 cm). Nous voyons en effet une vitesse plus élevée de 80 m/s sur le plot de 15 cm par rapport au plot de 30 cm d'épaisseur. Ce phénomène peut aussi être lié à l'amortissement plus conséquent du fait de l'augmentation de l'épaisseur de ballast ou à des trajets plus longs dans l'épaisseur de 30 cm ballast avec un nombre plus conséquent de grains (figure 4.21 et paragraphe 4.3.2.4). Les écart-types définis sur le tableau 4.4 font suite à 3 essais pour chaque modalité soit une moyenne sur un nombre de de 12 à 32 valeurs suivant les modalités.

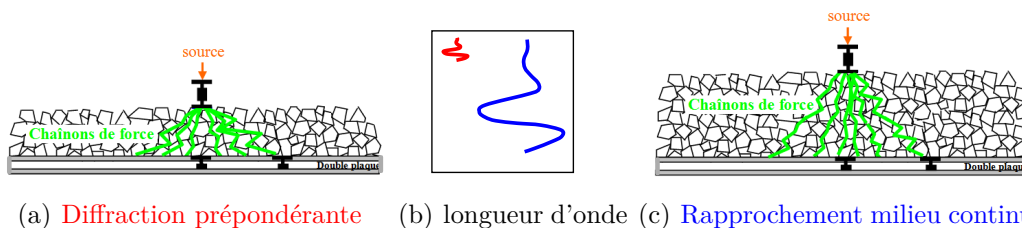


Figure 4.21 – Schéma de l'influence de l'épaisseur de ballast sur le trajet des ondes

4.3 Essais de référence

4.3.2.4 Force mesurée à travers une couche de ballast

La synthèse des résultats expérimentaux en force est présentée sur la figure 4.22. Ce graphe montre que l'effort transmis est plus conséquent à l'aplomb de la sollicitation (environ 25 % en plus) plutôt qu'au niveau du capteur déporté de 25 cm par rapport à la source, ce qui était attendu. Les chaînons de force du ballast présentent une diffusion verticale concentrée à l'aplomb de la source. Ce constat corrobore bien les résultats de vitesse de propagation où l'on a des vitesses plus faibles à l'aplomb de la sollicitation avec une épaisseur de 30 cm par rapport à 15 cm (figure 4.20).

Avec une épaisseur de 15 cm de ballast, nous constatons que le ballast amortit l'effort de 75 % alors qu'avec 30 cm de ballast, l'effort est amorti de 85 %. De plus, nous observons que l'amortissement est plus conséquent lorsque l'épaisseur du ballast augmente, montrant l'amortissement de la sollicitation à la source par l'augmentation de l'épaisseur de ballast. Il est plus faible de 10 % avec 30 cm plutôt qu'avec 15 cm pour une même hauteur de chute en augmentant l'épaisseur. De plus une épaisseur de 30 cm de ballast conduit à avoir une dispersion des chaînons de force suite à un trajet plus long (figure 4.21).

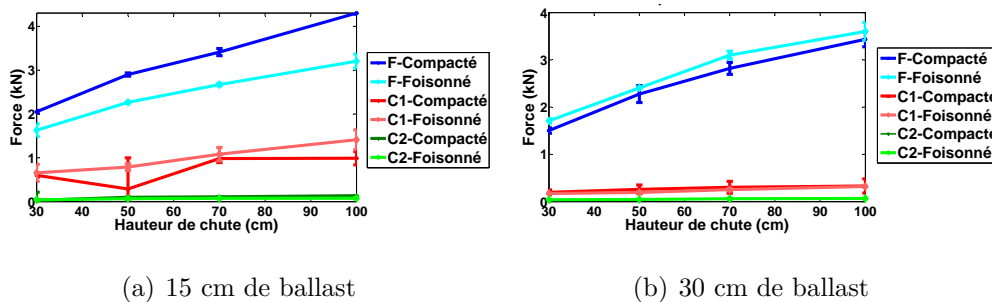


Figure 4.22 – Force mesurée sur les différents essais avec la plaque d'appui posée

Dans ce contexte une normalisation⁴ des enregistrements a été réalisée (figure 4.23) afin de retirer la différence d'effort à la sollicitation entre les deux épaisseurs de ballast.

Les courbes normalisées ne sont pas confondues pour les modalités avec 15 cm et 30 cm de ballast, ce qui reflète une non linéarité de la propagation des efforts dans le ballast en fonction de l'effort exercé à la source.

Quelques résultats expérimentaux du plot restreint de ballast sont présentés en Annexe C.1 pour une hauteur de chute de 30 cm et avec la plaque d'impact posée sur le ballast.

4. la normalisation consiste à établir un référentiel commun. Ici on ramène toutes les valeurs maximales à 1

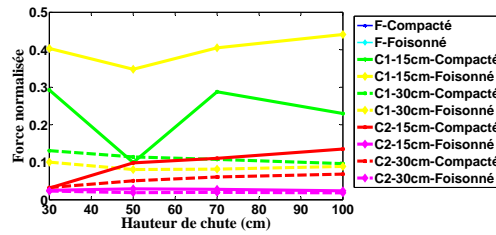
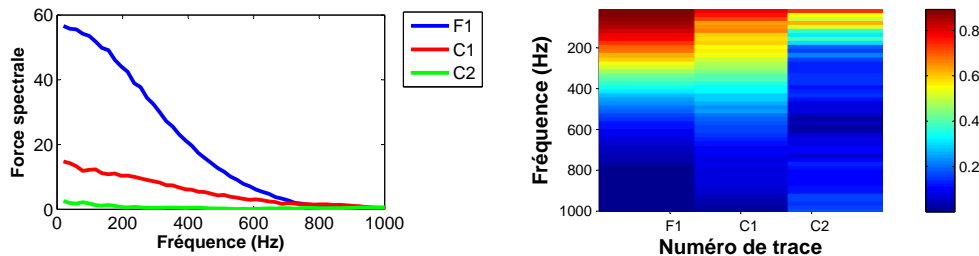


Figure 4.23 – Force normalisée enregistrée sur le plot expérimental - plaque d'appui posée

4.3.2.5 Spectre de force

Le signal mesuré (figure 4.19) est influencé par l'utilisation d'un élastomère sur le capteur afin de rendre le choc mou. Le signal expérimental suit la forme d'une gaussienne. La transformée de Fourier d'une gaussienne est une gaussienne centrée sur 0. Ce traitement réalisé sous Matlab ne donne pas la valeur de la fréquence prépondérante du signal mais permet de voir l'atténuation fréquentielle en fonction de la distance en visualisant le spectre normalisé par rapport à la fréquence maximale des enregistrements (f_{max}) des trois capteurs de force (figure 4.24).



(a) Spectre d'amplitude de la force mesurée (b) Forces normalisées par rapport à la fréquence maximale

Figure 4.24 – Exemple de résultats de spectre de force - 15 cm de ballast compacté - plaque posée - Hauteur de chute de 30 cm

Ainsi, on voit que l'atténuation fréquentielle est plus conséquente sur le capteur déporté que dans l'axe de la sollicitation ce qui corrobore les résultats précédents.

La détermination de la fréquence prépondérante du signal est faite en considérant le signal comme un demi-sinus sur une période de temps conduisant à une fréquence approximative de 140 Hz.

4.4 Modélisation du plot expérimental par éléments finis

La modélisation numérique continue des essais a été réalisée par la méthode des éléments finis sous CESAR-LCPC (Humbert et al., 2005). L'objectif est de pouvoir prédire par la modélisation l'effort induit par une sollicitation dynamique au travers d'une couche de ballast ferroviaire en considérant ce milieu comme un milieu continu et ainsi comparer les résultats de l'expérimentation avec les résultats numériques. La démarche a pour but d'évaluer la pertinence du modèle continu pour le ballast qui est un milieu discret.

Les modélisations numériques sont réalisées sur le plot foisonné avec une épaisseur de 15 et 30 cm pour une modalité d'essai soit quatre chutes.

4.4.1 Paramètres de la modélisation continue du ballast

4.4.1.1 Géométrie du modèle

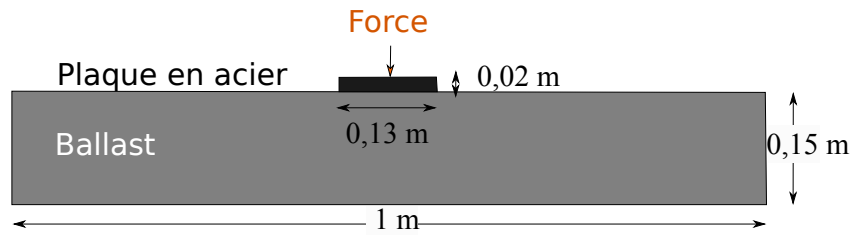


Figure 4.25 – Modèle aux éléments finis du plot (CESAR-LCPC)

Le dispositif modélisé (figure 4.25) comprend une plaque en acier de 2 cm d'épaisseur et de 13 cm de côté reposant sur une couche de ballast de 15 cm de hauteur et de 1 m de largeur en appui sur un support rigide. Ce massif de ballast de 1 x 1 x 0,15 m est modélisé par la méthode des éléments finis avec une plaque recevant les forces dynamiques.

4.4.1.2 Maillage et conditions limites

L'effort est mesuré en entrée et en sortie de l'élément de ballast.

La maille (δx) définie pour le modèle est fonction des longueurs d'ondes minimales pour le dispositif considéré selon la relation $\delta x = \lambda_{min}/10$. Dans notre cas, $\lambda_{min}^P = V_P/f_{max}$. Ainsi pour une vitesse de compression mesurée à 300 m/s, une fréquence maximale de 300 Hz, la distance internodale est de 10 mm au minimum avec une longueur d'onde de 1 m. Le modèle comporte ainsi une seule longueur d'onde. Les ondes n'ont pas le temps de se développer

car l'on se situe dans le domaine du champ proche. La discrétisation spatiale en éléments triangulaires est réalisée avec un pas de 10 mm sur le tiers du plot à l'aplomb de la sollicitation et avec un pas variable de 10 à 25 mm autour de la plaque en acier permettant ainsi un quadrillage représentatif des longueurs d'ondes minimales (figures 4.25).

Les conditions aux limites bloquent les deux composantes du déplacement (x et y) sur les côtés et en bas (figure 4.26) du massif de ballast.

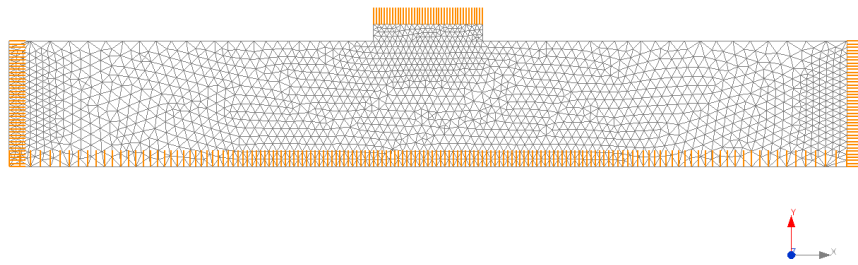


Figure 4.26 – Maillage et conditions limites de la modélisation FEM (CESAR-LCPC)

4.4.1.3 Caractéristiques du modèle

La réponse dynamique d'une couche de ballast foisonné de 15 cm d'épaisseur est étudiée par éléments finis et intégration en temps (module DYNI de CESAR-LCPC, [Humbert et al. \(2005\)](#); [Martin \(2014\)](#) pour décrire le ballast de façon continue. Généralement une analyse est réalisée sur les paramètres du modèle afin de retrouver les valeurs mesurées expérimentalement. Dans notre cas, nous préférons faire la démarche inverse en prenant les paramètres utilisés dans la littérature (amortissement, coefficient de Poisson) concernant le ballast pour évaluer le modèle continu. Nous avons choisi de réaliser deux modèles : en déformation plane et en axisymétrie (symétrie de révolution).

La plaque en acier est de forme rectangulaire : cela équivaut à une semelle filante en déformation plane et à une forme circulaire dans le cas axisymétrique. Pour le modèle en déformation plane, on s'écarte de l'amortissement géométrique réel. En effet, dans ce cas, ce dernier est plus faible que dans la réalité du fait de la propagation sur une ligne infinie perpendiculaire au plan du modèle.

Pour la modélisation en axisymétrie, la surface d'une plaque circulaire équivalente à celle de l'expérimentation de forme carrée ($S = 0,0169 \text{ m}^2$) conduit

4.4 Modélisation du plot expérimental par éléments finis

à un rayon de 7,3 cm. Cette équivalence de surface permet ainsi de se rapprocher de la surface en contact même si l'on a un biais vis-à-vis de la forme de la plaque. L'axisymétrie a pour intérêt de se rapprocher des caractéristiques de l'expérimentation 3D à partir d'un modèle en 2D. Nous avons considéré des déformations planes qui permettent de prendre en considération une tranche de sol avec une dimension perpendiculaire à la sollicitation infinie.

4.4.1.4 Chargement appliqué

La figure 4.27 présente le schéma du chargement appliqué sur la structure maillée.

Le signal du capteur F, enregistré sur la planche expérimentale, est utilisé comme chargement pour la modélisation. La force générée par la chute de masse varie de 1,4 à 2 kN pour une hauteur de chute de 30 cm (figure 4.22). Dans la suite des calculs numériques nous étudierons le cas d'une force maximale de 1,4 kN.

La donnée d'entrée du modèle étant une pression linéairement répartie, il est nécessaire d'appliquer une contrainte correspondant à un effort de 1 kN ($\sigma = \frac{F}{S}$) soit une contrainte de 0,059 MPa sur une surface de 0,0169 m² (surface de la plaque en acier) et de multiplier par les valeurs d'effort définies dans le fichier du signal réel comprenant 300 pas de temps de 0,1 ms soit une durée d'enregistrement de 30 ms (figure 4.27) ; cette durée a été choisie afin de laisser un nombre suffisant d'échantillons après le pic maximal pour laisser l'onde se propager dans le modèle. En balayant les différents pas de temps, le modèle atteint une valeur maximale de contrainte au pas de temps 17/300 soit 1,7 ms.

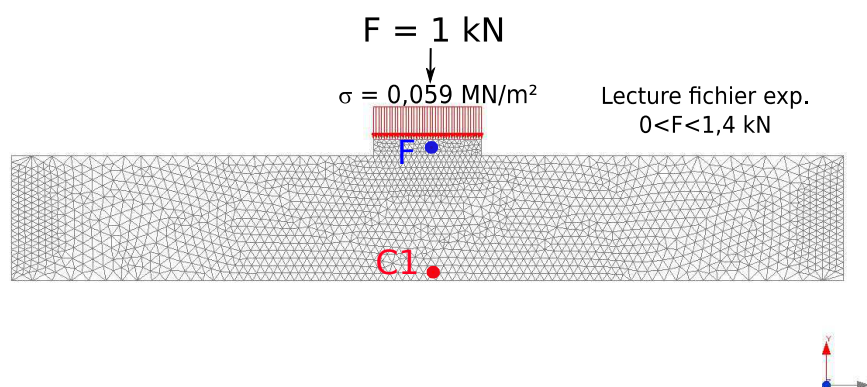


Figure 4.27 – Définition du chargement appliqué et des points de mesure

Avec une force maximale de 1,4 kN, une surface de 0,0169 m², nous obtenons, sur le point 1 nommé F, une valeur de contrainte à ce pas de temps de 0,082 MPa (figure 4.28).

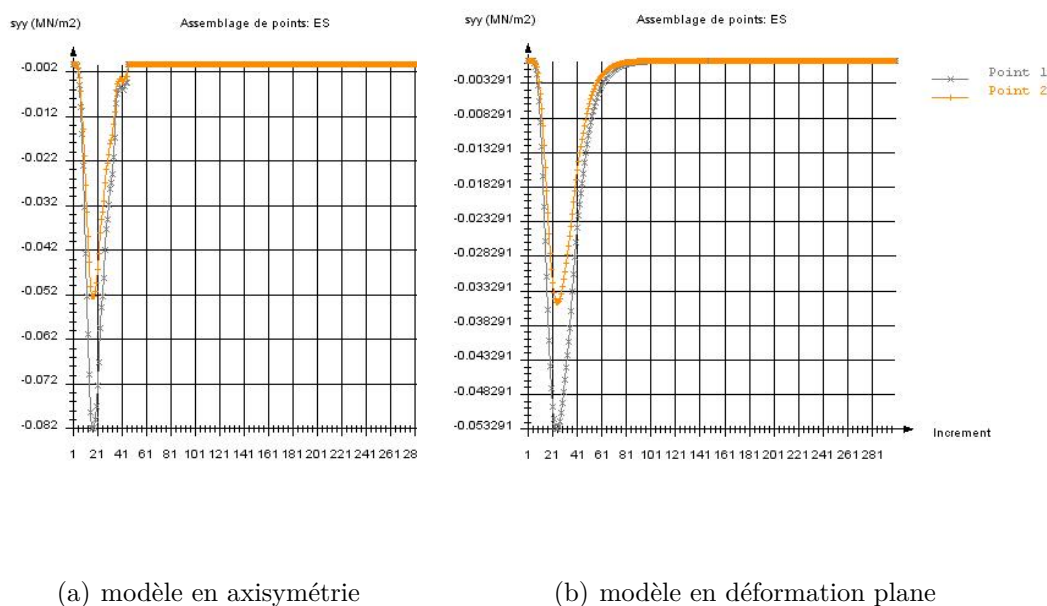


Figure 4.28 – Visualisation de deux exemples de courbes de contrainte σ_{yy} au point 1 nommé F et au point 2 nommé C1 du maillage - 15 cm ballast foisonné

Dans certains cas nous observons une contrainte à la source différente de la valeur attendue montrant ainsi un mauvais paramétrage des coefficients d'amortissement de Rayleigh. Des bulbes d'amplification de contrainte sont visibles sur les bords de la plaque en acier en contact avec le ballast à un niveau de 0,518 MPa (figure 4.29).

Les résultats des figures 4.33, 4.34 et de l'annexe C.5 sont donnés pour une durée de signal de 6 ms afin de mieux visualiser les courbes. Deux points du maillage ont été définis en entrée et en sortie du ballast pour quantifier les niveaux de contrainte à l'aplomb de la sollicitation dynamique (figure 4.27).

Nous observons sur la figure 4.28 que les courbes atteignent une valeur de 0,082 MPa (point F) pour ce pas de temps (17/300), correspondant à la valeur expérimentale mesurée soit une valeur d'effort de 1,4 kN. Ce résultat est vrai pour le calcul avec les paramètres $\alpha=0,001$ et $\beta=0,02$ pour un modèle en axisymétrie. Dans les autres cas testés, les coefficients sont tels qu'une partie ou tout le signal est amorti à la source. Ainsi les valeurs de contrainte sont très faibles ou inférieures à 0,082 MPa (annexe C.3).

4.4 Modélisation du plot expérimental par éléments finis

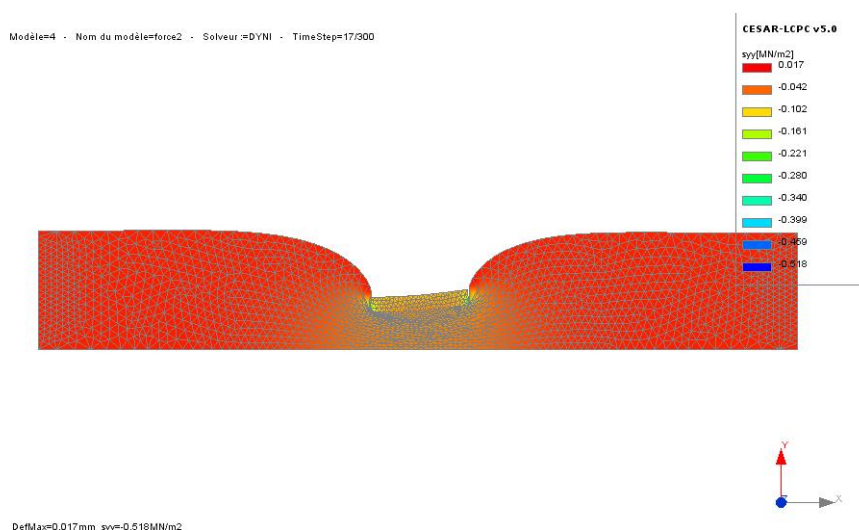


Figure 4.29 – Exemple de visualisation des isovaleurs de contrainte σ_{yy} - 15 cm ballast foisonné - $\alpha = 0,001$, $\beta = 0,2$ - maillage déformé

4.4.1.5 Détermination des paramètres - Amortissement de Rayleigh

Le calcul de l'amortissement de Rayleigh est fonction du paramètre de pulsation ω (équation 4.5). Cette méthode est difficilement applicable à un choc car la fréquence et par la même la pulsation du signal sont déterminées en faisant une approximation à partir de l'enregistrement en considérant le signal comme un demi-sinus. Avec un signal de 36 points, une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz, on obtient une période de 9 ms soit une fréquence de 140 Hz et une pulsation de 880 rd/s.

La réponse d'un choc étant très rapide, il a été nécessaire de rajouter un élastomère pour rendre le choc mou et ainsi permettre une visibilité des phénomènes sur un temps plus long. De ce fait, la définition de l'amortissement de Rayleigh n'est pas précise dans le cas d'un choc et est plus adaptée à des vibrations de plus longue durée.

Définition des coefficients d'amortissement limites Dans le cas de l'étude, dans un premier temps, nous privilégions de répartir l'amortissement ξ (paragraphe 4.2.1.2 à la page 118) sur les cas extrêmes en faisant porter l'amortissement soit par le paramètre α en considérant β égal à zéro soit par le paramètre β en considérant α égal à zéro.

Suivant la relation 4.5 et en choisissant un amortissement pour le ballast de 0,03 (tableau 4.5 et Galvin & Dominguez (2008)), nous obtenons les couples de coefficients suivants :

- $\alpha = 41, \beta = 0$,
- $\alpha = 0, \beta = 8.10^{-5}$.

Définition des coefficients d'amortissement du modèle de Maxwell généralisé : Semblat et al. (2011) ont décrit la méthode de calcul pour déterminer les coefficients α et β pour une fréquence centrale correspondant au signal selon le modèle rhéologique de Maxwell généralisé (figure 4.30).

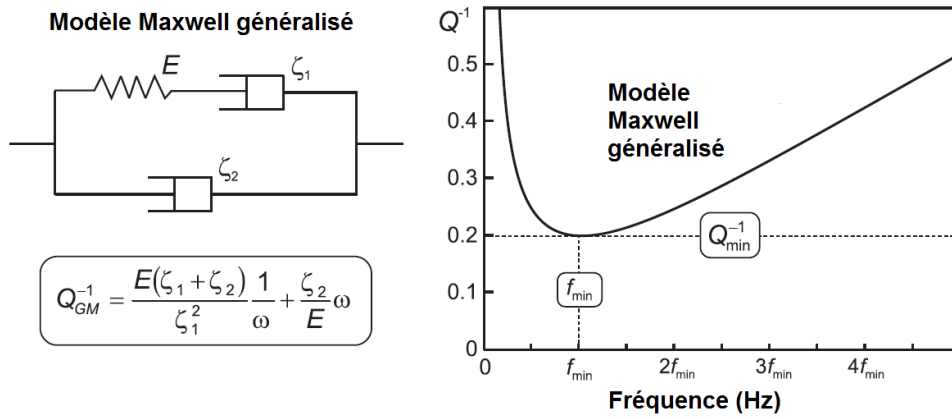


Figure 4.30 – Modèle Maxwell généralisé et correspondance des coefficients d'amortissement pour des ondes longitudinales.

L'équation de ce modèle (équation 4.5 à la page 120) permet de définir la solution par dérivation de l'amortissement par rapport à la pulsation $\frac{\partial \eta}{\partial \omega}$:

$$\frac{\partial \eta}{\partial \omega} = -\frac{\alpha}{\omega^2} + \beta \quad (4.10)$$

conduisant à

$$f_{min} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \quad (4.11)$$

et à

$$\beta = \frac{\alpha}{2 * \pi * f_{min}^2} \quad (4.12)$$

Plusieurs valeurs de α sont fixées et l'on détermine pour un amortissement donné ξ de 0,03 et pour une fréquence centrale f_{min} de 140 Hz la valeur de β

4.4 Modélisation du plot expérimental par éléments finis

afin de définir plusieurs couples α , β selon le modèle. Une fonction sous Matlab a été programmée afin de faciliter la visualisation des différentes courbes obtenues en fonction des paramètres choisis.

Le couple se rapprochant le plus de la solution est celui avec $\alpha = 20$ et $\beta = 2,5847 \cdot 10^{-5}$. En effet la droite horizontale correspondant à un amortissement ξ de 3 % doit couper la base de la courbe en étant centrée sur la fréquence du signal de 140 Hz (figure 4.31(a)).

Il est à noter qu'en baissant la fréquence centrale à 20 Hz on obtient une meilleure forme de courbe (figure 4.31(b)).

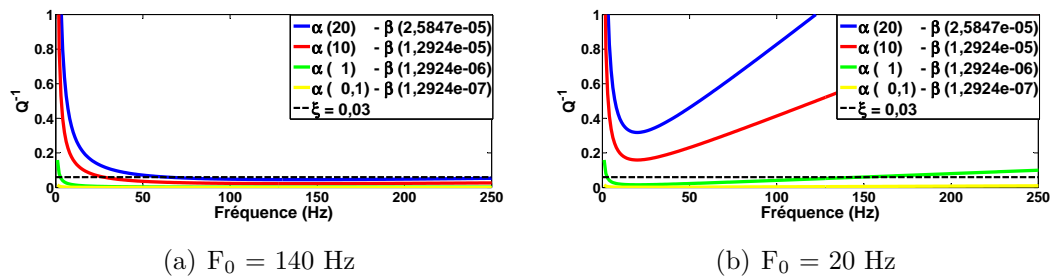


Figure 4.31 – Calage des paramètres de Rayleigh α et β selon le modèle de Maxwell généralisé.

Détermination empirique des coefficients d'amortissement Ce choix intervient après avoir visualisé les contraintes verticales des modélisations en prenant les paramètres d'amortissement décrits dans les deux chapitres précédents. En effet, les valeurs ne sont pas cohérentes car la contrainte verticale ne revient pas à zéro après le choc alors qu'elle le devrait, comme le montrent les résultats expérimentaux (figure 4.19 à la page 139). Les paramètres fixés après une brève étude paramétrique conduisent à retenir deux jeux de valeurs (figures 4.33 et 4.34) pour deux types de modèles (en déformation plane et en axisymétrie) :

- $\alpha = 0,001$, $\beta = 0,02$,
- $\alpha = 0,004$, $\beta = 0,02$.

Un calcul par éléments finis sous CESAR, correspondant à une hauteur de chute de masse de 30 cm est réalisé pour une épaisseur de ballast de 15 cm à un état foisonné avec une masse volumique de $1,51 \text{ t/m}^3$ (on applique l'impulsion mesurée sur le plot expérimental).

Les paramètres renseignés dans le logiciel CESAR sont définis dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 – Paramètres de la modélisation

Matériau	Masse volumique (t/m ³)	Module d'Young (MPa)	Coefficient de Poisson	Amortissement (kNs/m)	α	β
Plaque acier	7,5	210.10 ³	0,3			
Ballast	1.51	400	0,3	0,03	41	0
					0	8.10 ⁻⁵
					20	2, 58.10 ⁻⁵
					0,0001	0,02
					0,0004	0,02

4.4.2 Résultats de la modélisation en mécanique des milieux continus

4.4.2.1 Préalable

La couche de ballast de 300 mm d'épaisseur comprend une dizaine d'éléments de granulométrie variable de 25 à 63 mm ce qui conduit à un rapport $\frac{e}{\Phi_g}$, avec e l'épaisseur de la couche de ballast et Φ_g le diamètre des grains, compris entre 5 et 12 (paragraphe 4.2.1.1 à la page 115)

Ainsi, l'épaisseur de 600 mm est la taille minimale pour garantir le critère d'homogénéité, ce qui montre que les configurations avec une épaisseur de 15 et 30 cm de ballast peuvent générer une dispersion numérique en considérant la taille maximale des grains. En complément, il est important de déterminer les longueurs d'ondes pour le dispositif considéré.

Des réflexions parasites sont prévisibles sur les bords du modèle. En effet, en considérant une vitesse de 175 m/s (figure 4.20), une distance de 15 cm entre les deux points de mesure (F et C1, figure 4.27), l'onde présente une réflexion sur le fond du modèle à un temps de 0.85 ms. Le temps approximatif du choc étant de 3,6 ms, ceci montre des réflexions parasites après le pic maximal du choc (figure 4.32).

La figure 4.32 montre que le pic des deux capteurs n'est pas concerné par ces réflexions et que la modélisation est recevable pour la configuration avec 15 cm de ballast.

Dans ce contexte, il pourrait être intéressant de considérer, par la suite, des frontières absorbantes (Nguyen, 2002; Madec, 2010; Semblat et al., 2010, 2011) pour le modèle avec une épaisseur de 15 cm de ballast afin de valider le modèle continu. L'effet de la taille du maillage sur la propagation est un paramètre qui pourrait être traité en parallèle afin de visualiser ces réflexions

4.4 Modélisation du plot expérimental par éléments finis

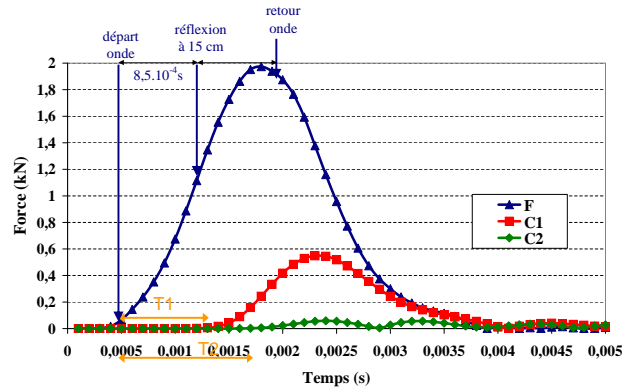


Figure 4.32 – Visualisation des réflexions sur le fond du modèle avec une épaisseur de ballast de 15 cm.

parasites.

4.4.2.2 Étude de sensibilité des paramètres de Rayleigh

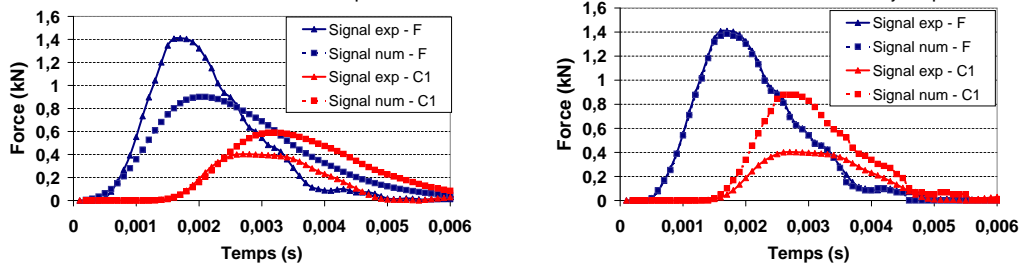
La fonction de transfert au travers du ballast est quantifiée en visualisant la valeur de la contrainte verticale au point 1 (capteur F) sous la plaque en acier et au point 2 (capteur C1) à la base du ballast à un nœud en-dessous et au-dessus de la ligne d'application des conditions aux limites (figure 4.27).

Les résultats obtenus (annexe C.3) montrent que, dans les deux cas, avec des coefficients d'amortissement limites, la modélisation continue ne permet pas d'atteindre les résultats expérimentaux à la base du ballast. Cette approche nécessite d'ajuster les valeurs des paramètres pour atteindre les valeurs des résultats expérimentaux.

Les courbes obtenues pour la modalité “foisonné” avec les coefficients déterminés par le modèle de Maxwell généralisé sont similaires à ceux du cas limite α égal à 40. Ainsi, les résultats ne sont pas satisfaisants. Cette méthode ne reflète pas la réalité des essais car l'amortissement est trop conséquent pour ce matériau (annexe C.3).

Dans ce contexte, une brève étude paramétrique est réalisée pour compléter cette analyse sur les coefficients des matrices de masse et de rigidité afin de voir si l'on peut améliorer le résultat en balayant différents cas (figure 4.33).

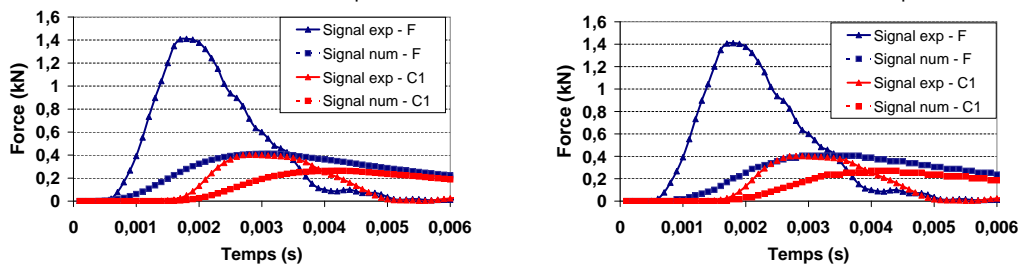
Deux modalités significatives ont été retenues. Le travail a consisté à déterminer le paramètre α afin d'obtenir la même valeur d'effort à la source



(a) Modèle sous César en déformation plane

(b) Modèle axisymétrique sous César

Figure 4.33 – Exemples significatifs des résultats de modélisation suite à une étude paramétrique - $\alpha = 0,001$, $\beta = 0,02$ - 15 cm de ballast foisonné



(a) Modèle sous César en déformation plane

(b) Modèle axisymétrique sous César

Figure 4.34 – Exemples significatifs de résultats de modélisation suite à une étude paramétrique - $\alpha = 0,004$, $\beta = 0,02$ - 15 cm de ballast foisonné

qu'expérimentalement et d'augmenter β afin que les contraintes reviennent à zéro après le choc. Néanmoins cette étude paramétrique avec une modélisation continue ne permet pas d'obtenir des résultats se rapprochant de la réalité. En effet, le signal numérique du capteur "C1" ne se cale pas bien sur la valeur expérimentale "signal exp F" et l'on simule un effort en sortie du ballast deux fois plus fort que dans la réalité (figure 4.34(b)).

Le pic des deux capteurs n'étant pas concerné par les réflexions sur les bords du modèle, la géométrie de la modélisation est acceptable. Il conviendrait dans un second temps de définir des frontières absorbantes sur les bords du modèle afin de valider le modèle continu et aussi de tester l'effet de la taille du maillage sur la propagation.

La modélisation du ballast par un milieu continu est moins bien adaptée qu'une simulation discrète. Les résultats ne sont pas satisfaisants malgré les différentes pistes exploratoires menées au cours de cette étude avec parfois des solutions excessives en définissant des cas extrêmes. Dans ce contexte, il est intéressant d'étudier une simulation discrète plus adaptée au matériau étudié.

4.5 Simulation discrète du plot expérimental

La simulation discrète permet de modéliser séparément les particules qui constituent le milieu granulaire et de suivre leurs évolutions dans le temps. Le dépôt des grains de cette simulation discrète a été réalisé par la méthode de pluviation consistant à lâcher les grains à partir d'une hauteur donnée afin de constituer une couche. Le temps de calcul par cette méthode est élevé surtout s'il faut également simuler le compactage une fois la couche constituée. Cette méthode est utilisée pour la modélisation discrète (Dimnet, 2002; Jacqueline et al., 2015) afin de recréer une couche de ballast de 15 et de 30 cm d'épaisseur.

Une fois la couche créée, une sollicitation d'impact est générée à la surface du ballast sur une plaque en acier. La méthode de calcul utilisée est la méthode A-CD² (Dimnet, 2002) de simulation des milieux granulaires. La dynamique de chaque contact est modélisée par des lois qui lient les déplacements et les efforts. Cela permet de modéliser le réarrangement des grains et la densification du milieu.

4.5.1 Méthode de calcul

La méthode de calcul A-CD² du code STTAR3D a été développée à l'IF-STTAR pour réaliser des calculs de systèmes granulaires polyédriques en 3D (Dimnet, 2002; Dal Pont, S. & Dimnet, 2008). La méthode a quelques similitudes avec la méthode de contact dynamique de Jean (1999) puisque les grains sont en contact unilatéral. Elle utilise néanmoins une formulation différente des équations de contact.

L'hypothèse de base sur l'évolution du système multi-corps est que les solides ont des vitesses constantes pendant les intervalles de temps de discrétisation et des sauts de vitesse aux limites de ces intervalles.

La première conséquence est que les forces sont concentrées dans le temps ; elles sont nommées percussions et sont appliquées aux solides aux instants de sauts de vitesse (limites des intervalles de temps discrétisation).

La deuxième conséquence est que deux catégories de forces doivent être distinguées : les forces en fonction des vitesses et celles qui ne sont pas une fonction des vitesses. Dans les simulations présentées, les seules forces ne dépendant pas des vitesses sont les forces de gravité.

$$\underline{F} = m\underline{g} \quad (4.13)$$

Cette force doit être appliquée au centre de gravité de chaque grain à des instants discontinus, sous la forme d'une percussion.

$$\underline{P^{ex}} = \underline{F}\delta t \quad (4.14)$$

Avec :

- δt , le pas de temps choisi pour le calcul
- $\underline{P^{ex}}$, la percussion au point d'impact qui dépend des vitesses et qui doit donc être considérée comme les équations attendues de résolution des vitesses de choc.

Les forces dépendant des vitesses sont des forces de contact. Leur expression à des instants de vitesses de saut U^- et U^+ comporte des limites gauche et droite de vitesses aux instants de vitesse de sauts. La limite gauche des vitesses est connue à cet instant. Ainsi, les percussions $\underline{P^{ex}}$ sont connues. Les formulations des percussions de contact sont des fonctions de U^- et U^+ en considérant l'équilibre des équations des moments. Ces fonctions conduisent à un système d'équations permettant de calculer les bonnes limites des vitesses U^+ et à passer au pas de temps suivant.

Rappelons que les contacts entre les grains doivent être calculés avant de résoudre les équations, aussi les forces de contact apparaissent dans les équations sous la forme de percussions appliquées aux points de contact correspondants. Les points de contact sont déterminés en prenant en compte les positions des grains à l'instant de variation de vitesse.

On peut résumer la méthode par les trois étapes récursives suivantes :

1. Les grains se déplacent à vitesse constante pendant δt ,
2. Les contacts sont déterminés avec les positions des grains à la fin de δt ,
3. Les nouvelles vitesses sont calculées ; elles remplacent celles de l'étape 1.

4.5.1.1 Équation des variations de vitesse

Comme le problème posé à l'étape 3 présente une discontinuité, un modèle de collision instantanée est utilisé pour décrire la variation brusque de vitesse. Par souci de simplicité, [Frémond \(1995\)](#); [Dimnet \(2002\)](#), le modèle est d'abord exposé à un seul point d'entrée en collision avec une surface fixe et rigide présentant une vitesse instantanée discontinue, avant la généralisation de la formulation à une collision simultanée de N grains rigides.

4.5.1.2 Modèle de collision instantanée à un seul point de collision

La collision est supposée instantanée, ainsi la vitesse \underline{U} du point est discontinue au moment de la collision, ayant des limites gauche et droite notées

4.5 Simulation discrète du plot expérimental

\underline{U}^- et \underline{U}^+ . La force de contact est concentrée dans le temps, devenant une percussion notée \underline{P}^{int} (Frémond, 1995).

Une percussion prévisible \underline{P}^{ex} , ne dépendant pas de \underline{U} peut également être prise en compte en l'appliquant au point au moment de la collision. Cette percussion est utilisée plus tard dans le procédé A-CD2 afin de tenir compte des forces ne dépendant pas des vitesses dans les équations de variation de vitesse.

4.5.1.3 Lois de comportement

Les lois de comportement ont pour modèle les interactions de contact pendant la collision dissipative et lorsque le point ne pénètre pas la surface du grain. Ces deux conditions sont obtenues en divisant la percussion interne par la percussion de dissipation \underline{P}^d , modélisant l'interaction dissipative de la collision et une percussion réactive \underline{P}^{reac} assurant la non-interpénétration, qui peut ainsi être considérée comme la réaction de non interpénétration $\underline{U}^+ - \underline{F}_N \geq 0$ avec \underline{F}_N la force normale de collision.

$$\underline{P}^{int} = \underline{P}^d + \underline{P}^{reac} \quad (4.15)$$

La percussion dissipative est formulée en utilisant un pseudo-potentiel de dissipation Φ^d , qui est convexe; la fonction est positive et nulle à l'origine (Moreau, 1966).

$$\underline{P}^d \in \delta \Phi^d \left(\frac{\underline{U}^- + \underline{U}^+}{2} \right) \quad (4.16)$$

La percussion réactive, condition de réaction de non-interpénétration, est formulée en utilisant les fonctions indicatrices I_x (Moreau, 1966) :

$$\underline{P}^{reac} \in \delta I_K \left(\frac{\underline{U}^- + \underline{U}^+}{2} \right) \cdot \underline{F}_N, K = \left[\frac{\underline{U}^- \cdot \underline{F}_N}{2}, \infty \right] \quad (4.17)$$

Comme K est convexe et contient la valeur 0, la fonction d'indicateur I_K est un pseudo-potentiel de dissipation (Moreau, 1966) et la percussion interne peut être écrite de la manière suivante :

$$\underline{P}^{int} \in \delta \Phi \left(\frac{\underline{U}^- + \underline{U}^+}{2} \right) \quad (4.18)$$

$$\Phi = \Phi^d + I_K \quad (4.19)$$

Comme c'est une somme de pseudo-potentiels de dissipation, Φ est également un pseudo-potentiel de dissipation. Cela permet de prouver l'existence et l'unicité de \underline{U}^+ ainsi que le fait que la collision est toujours dissipative.

4.5.1.4 Collision simultanée de N grains

Selon les hypothèses faites à propos de l'évolution du système, en particulier sur le mouvement des solides à des vitesses constantes pendant un temps δt , le problème a été résolu, en considérant la vitesse de choc comme une collision simultanée de plusieurs grains. En effet, tous les contacts se produisant pendant un temps δt se produisent à l'instant du choc. Le problème à résoudre devient ainsi semblable à une collision instantanée de plusieurs solides avec des vitesses connues avant la collision.

Par conséquent, le modèle de collision instantanée exposé ci-dessus pour un point donné doit être généralisé pour N collisions de corps possédant une masse m_i , de centre de gravité G_i , et de tenseur interne I_i .

L'ensemble des points de contact solide i et solide j est noté S_{ij} . Ces contacts entre solides sont supposés ponctuels. Le $k^{\text{ième}}$ contact entre le solide i et le solide j a lieu au point \underline{A}^{ijk} et $\underline{P}_{int}^{ijk}$ est la percussion de contact à ce point.

L'ensemble des points où les percussions prévisibles sont appliquées au solide i est noté \underline{S}^i . La percussion \underline{P}_{il}^{ex} est appliquée au $l^{\text{ième}}$ point de cet ensemble noté \underline{B}_{il} .

La vitesse au centre de gravité G_i est notée \underline{U}_i et la vitesse de rotation du solide i est notée $\underline{\Omega}_i$ définissant le vecteur $\hat{U} = [\dots, \underline{U}_i, \underline{\Omega}_i, \dots]$.

Avec ces définitions, la vitesse relative de grains solides i et j au point de contact \underline{A}_{ijk} est donnée par la relation suivante :

$$\underline{D}^{ij}(\hat{U}, \underline{A}^{ijk}) = (\underline{U}_i + \underline{\Omega}_i \times \underline{G}_i \underline{A}_{ijk}) - (\underline{U}_j + \underline{\Omega}_j \times \underline{G}_j \underline{A}_{ijk}) \quad (4.20)$$

Et au point \underline{B}_{il} la vitesse du solide i est :

$$\underline{E}_i(\hat{U}, \underline{B}_{il}) = (\underline{U}_i + \underline{\Omega}_i \times \underline{G}_i \underline{B}_{il}) \quad (4.21)$$

Nous allons définir le produit scalaire :

$$\langle \hat{U} | \hat{V} \rangle = \sum_{i=1}^N m_i \underline{U}_i \cdot \underline{V}_i + I_i \underline{\Omega}_i \cdot \underline{\Omega}_i \quad (4.22)$$

le vecteur \hat{T}^{ex} tel que

$$\langle \hat{T}^{ex} | \hat{V} \rangle = \sum_{i=1}^N \sum_{\underline{B}_{il} \in S_i} \underline{P}_{il}^{ex} \cdot \underline{V}_i + (\underline{P}_{il}^{ex} \times \underline{B}_{il} \underline{G}_i) \cdot \underline{\Omega}_i \quad (4.23)$$

et le pseudo-potentiel Φ tel que

4.5 Simulation discrète du plot expérimental

$$\Phi(\hat{V}) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sum_{\underline{A}_{ijk} \in S_{ij}} \Phi_{ijk}(\underline{D}_{ij}(\hat{V}, \underline{A}_{ijk})) \quad (4.24)$$

Le problème à résoudre à chaque pas de temps du calcul devient

$$\forall \hat{V}, \langle \hat{U}^+ - \hat{U}^- \hat{T}^{ex} | \hat{V} - \left(\frac{\underline{U}^- + \underline{U}^+}{2} \right) \rangle + \Phi \left(\hat{V} - \Phi \left(\frac{\underline{U}^- + \underline{U}^+}{2} \right) \right) \quad (4.25)$$

Compte-tenu du fait que \mathfrak{R}^{6N} a un produit scalaire défini par $\langle \cdot | \cdot \rangle$ et de la définition de sous-gradient, la formulation précédente est équivalente à l'inclusion

$$-\hat{U}^+ - \hat{U}^- - \hat{T}^{ex} \in \delta \Phi \left(\frac{\underline{U}^- + \underline{U}^+}{2} \right) \quad (4.26)$$

En notant $\underline{X} = \frac{\underline{U}^- + \underline{U}^+}{2}$, nous obtenons

$$2\hat{U}^- + \hat{T}^{ex} \in \delta \Phi \left(\frac{\underline{U}^- + \underline{U}^+}{2} \right) \quad (4.27)$$

Cet ajout est finalement équivalent au problème de minimisation sous contrainte suivant :

$$\inf_{\underline{X} \in C} \langle \underline{X} | \underline{X} \rangle + \Phi^d(\underline{X}) - \langle 2\hat{U}^- + \hat{T}^{ex} | \underline{X} \rangle \quad C = \{ \underline{X} \in \mathfrak{R}^{6N} | \Phi_l(\underline{X}) \leq 0, \quad l = 1, p \} \quad (4.28)$$

La fonction Φ^d est la somme des parties dissipatives (équation 4.16), la fonction indicateur étant remplacée par les contraintes $\Phi_l(\underline{X})$ définissant l'ensemble C . La variable p est le nombre total de contacts. Un indice de contact l correspondant au point de contact \underline{A}_{ijk} , la contrainte correspondante est

$$\Phi(\underline{X}) = \left(\underline{D}_{ij} \left(\frac{\hat{U}}{2}, \underline{A}_{ijk} \right) - \underline{D}_{ij}(\underline{X}, \underline{A}_{ijk}) \right) \cdot \underline{F}_{N_l} \quad (4.29)$$

où \underline{F}_{N_l} est le vecteur normal au point de contact pointant vers le solide i .

Méthode numérique pour le calcul des vitesses de choc. La fonction $F(\underline{X})$ est définie par :

$$F(\underline{X}) = \langle \underline{X} | \underline{X} \rangle + \Phi^d(\underline{X}) - \langle 2\hat{U}^- + \hat{T}^{ex} | \underline{X} \rangle \quad (4.30)$$

Le problème à résoudre est un problème de minimisation sous contrainte de $F(\underline{X})$. La solution est un point de la fonction de Lagrange :

$$L(\underline{X}, \mu) = F(\underline{X}) + \sum_{l=1}^p \mu_l \Phi_l(\underline{X}) \quad (4.31)$$

On peut prouver l'existence et l'unicité de \underline{X}^* et des multiplicateurs de Lagrange μ^* , alors que l'unicité de μ^* est assurée uniquement si les contraintes correspondantes sont linéairement indépendantes (Ciarlet, 1989).

La fonction $F(\underline{X})$ ainsi que l'ensemble C étant convexe et les contraintes étant linéaires, la méthode d'Uzawa est utilisée pour le calcul du point (\underline{X}^*, μ^*) de $L(\underline{X}, \mu)$. Du point de vue algorithmique, la méthode consiste à résoudre une succession de problèmes de minimisation des contraintes :

1. Laisser $\mu_0 \in \mathbb{R}_p^+$ être la valeur initiale pour μ .
2. Calculer $\underline{X}_n = \arg \min \{F(\underline{X}) + \sum_{l=1}^p \mu_l \Phi_l(\underline{X}), \underline{X} \in \mathbb{R}^{6N}\}$.
3. Calculer $\mu_l^{n+1} = \max\{0, \mu_l^n + \rho \Phi_l(\underline{X}_n)\}$.
4. Répéter l'étape 2. jusqu'à ce qu'une condition de convergence soit satisfaite.

Dans les calculs présentés, les lois de comportement sont linéaires avec une fonction quadratique $\Phi^d(\underline{X})$. Ainsi, $F(\underline{X})$ est quadratique et la méthode du gradient conjugué est utilisée avec l'étape 2. Ceci est appliqué à l'état stationnaire :

$$\nabla L(\underline{X}_n, \mu_n) = \nabla F(\underline{X}) + \sum_{l=1}^p \mu_l \nabla \Phi_l(\underline{X}_n) = 0 \quad (4.32)$$

avec m , la masse et u le déplacement.

La résolution du problème de vitesse de choc permet d'obtenir des nouvelles vitesses de tous les grains du système et, simultanément, les forces de contact, grâce à des lois de comportement et la valeur des multiplicateurs de Lagrange.

4.5.1.5 Modèle mécanique

Afin de réaliser un modèle de ballast ferroviaire représentatif, les particules présentées par Huang (2010) ont été intégrés dans la méthode A-CD2 du code STTAR3D pour constituer une bibliothèque de formes de particules agrégées représentatives allant de cubique à angulaire, et de forme plate à allongée. Ces polyèdres sont présentés sur la figure 4.35.

4.5.1.6 Préparation des échantillons "numériques"

Une couche de ballast avec des grains de taille variant de 20 mm à 60 mm a été générée de manière aléatoire en utilisant les formes de la bibliothèque de granulats de Huang. Les particules ont été réparties au hasard dans les différents niveaux avec 100 mm de distance entre les niveaux. Les agrégats

4.5 Simulation discrète du plot expérimental

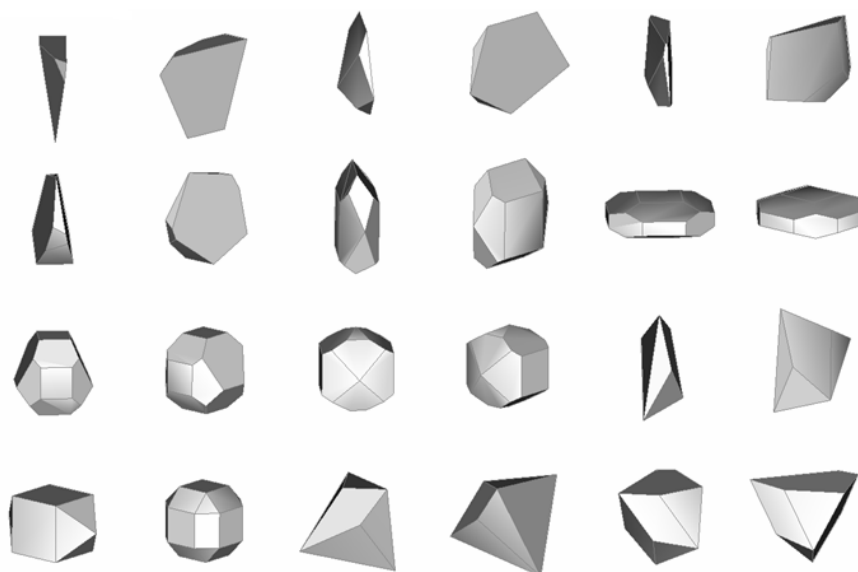
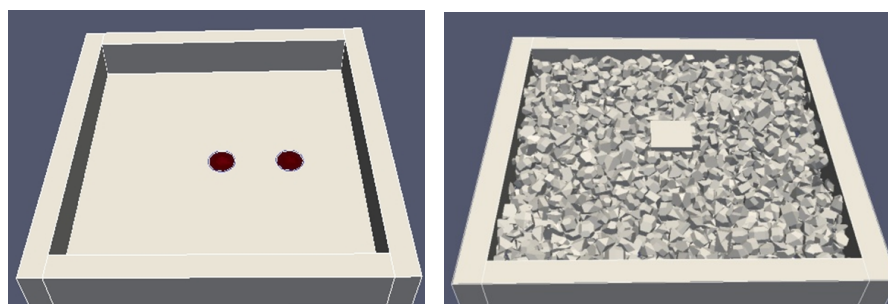


Figure 4.35 – Bibliothèque de granulats polyédriques ([Huang, 2010](#))

ont été distribués avec un entraxe de 60 mm dans les deux directions x et y pour ensuite être lâchés dans un espace de 1m x 1m x 0,15m (figure 4.36). Une couche de 150 mm a finalement été générée après la stabilisation et le compactage numérique.



(a) Plot simulé avec les deux cap- (b) Plot simulé avec le ballast et la
teurs à la base du ballast plaque de transmission des efforts

Figure 4.36 – Échantillon numérique de ballast avec les granulats de [Huang \(2010\)](#)

Un essai de densité de ballast a été réalisé dans un bac de ballast pour déterminer le nombre approximatif d'éléments de ballast pour une densité donnée afin de comparer le nombre obtenu à celui défini pour le cas du modèle discret. Pour un volume de $0,0173 \text{ m}^3$ et une masse de 29 kg (soit une masse volumique de $1,69 \text{ t/m}^3$), un nombre de 291 éléments de ballast a été compté.

4.5.1.7 Conditions aux limites

La couche de granulats est considérée comme un milieu granulaire avec des conditions limites unilatérales au fond et sur les côtés de l'échantillon. Les grains sont supposés rigides. Par conséquent, les contacts entre les grains sont les seules sources de dissipation dans le modèle (dissipation par friction).

Une plaque métallique de 130 mm × 130 mm × 20 mm placée sur la surface de ballast a été soumise à la charge d'impact sur le modèle numérique similaire aux conditions expérimentales. La réponse dynamique de cet impact est calculée en entrée et en sortie du ballast aux mêmes points que pour l'instrumentation du ballast (F et C1). Le point C2 n'est pas représenté car les résultats sont à la limite de la mesure.

Les mesures expérimentales sont décrites dans le chapitre 4.3.

Cette modélisation concerne une épaisseur de 15 cm de ballast foisonné soumise à 4 hauteurs de chute de masse (30, 50, 70 et 100 cm, cf. tableau 4.6).

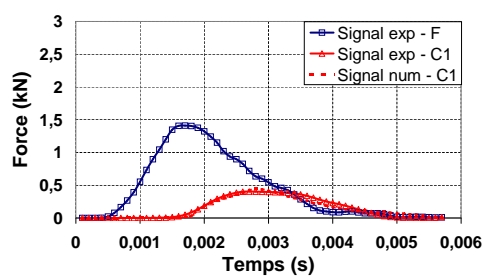
Tableau 4.6 – Paramètres de la modélisation discrète

Épaisseur de ballast	État de compactage	Hauteur de chute de la masse (m)	Numéro du test
15 cm	foisonné	0,3	1
		0,5	2
		0,7	3
		1	4
30 cm	foisonné	0,5	5
		0,7	6
		1	7

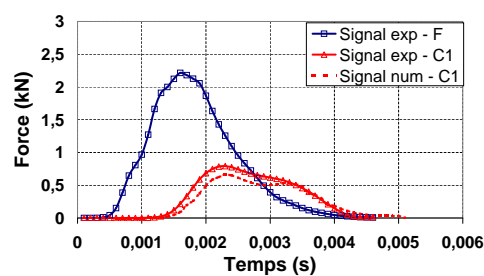
4.5.2 Résultats de la simulation discrète

Les résultats des simulations discrètes sont présentés sur les figures 4.37 et 4.38.

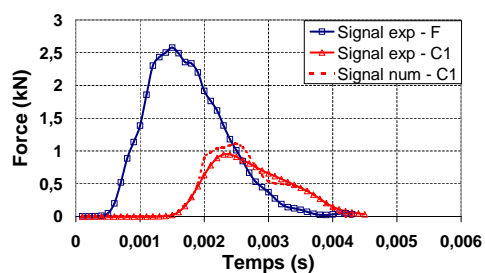
4.5 Simulation discrète du plot expérimental



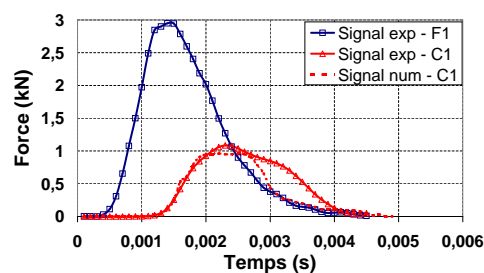
(a) Hauteur de chute de 30 cm



(b) Hauteur de chute de 50 cm

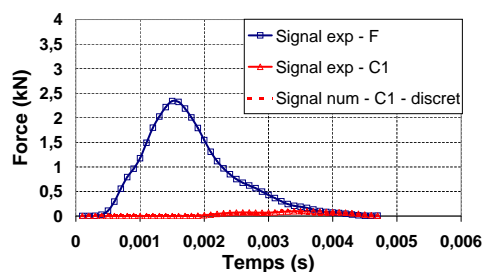


(c) Hauteur de chute de 70 cm

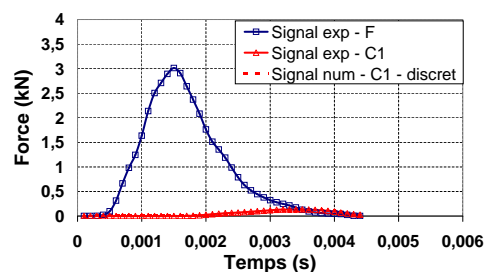


(d) Hauteur de chute de 100 cm

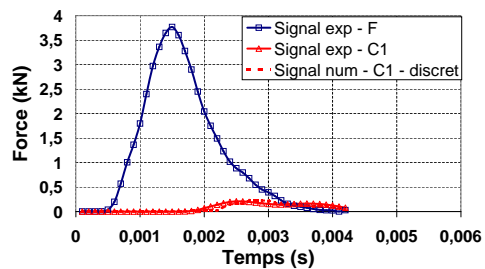
Figure 4.37 – Comparaison de la mesure et du calcul discret sur le capteur C1 - 15 cm de ballast foisonné



(a) Hauteur de chute de 50 cm



(b) Hauteur de chute de 70 cm



(c) Hauteur de chute de 100 cm

Figure 4.38 – Comparaison de la mesure et du calcul discret sur le capteur C1 - 30 cm de ballast foisonné

Tableau 4.7 – Récapitulatif de l'amortissement des essais modélisés par approche discrète (code STTAR3D)

Épaisseur de ballast (cm)	Hauteur de chute (cm)	Amortissement (%)		Ecart mesure- calcul (%)
		D_{exp}	D_{dis}	
15 cm	30	71,4	68,4	9
	50	64,2	70,1	16
	70	63,2	57,0	14
	100	63,2	67,4	11
30 cm	50	95,8	95,4	8
	70	95,5	95,8	7
	100	94,5	93,9	9

$$D_{dis} = G \left(\frac{C1_{dis}}{F_{exp}} \right) \quad (4.33)$$

Les forces calculées numériquement au moyen d'un modèle discret sur le capteur situé à la base du ballast coïncident bien avec les mesures expérimentales : la différence entre les maximums n'excède pas 15 % et la forme des deux courbes est très similaire. Les courbes expérimentales apparaissent néanmoins plus arrondies que celles calculées. La différence de décroissance d'amortissement entre la simulation discrète et l'expérimentation est comprise entre 7 à 14 % suivant la hauteur de chute de masse (tableau 4.7). Cette modélisation discrète donne des résultats proches de la réalité avec des hauteurs de chute allant de 30 à 100 cm conduisant à une variation de 2 à 6 % de décroissance d'amplitude.

4.5.3 Comparaison simulation discrète/continue

La représentation des mesures avec les deux simulations indique que le modèle discret se cale mieux à la réalité avec une variation d'amplitude par rapport aux mesures expérimentales de quelques % tandis que la modélisation continue conduit à des résultats sur le capteur C1 dont l'amplitude est deux fois plus grande que pour les essais. Dans les deux cas de modélisation, la forme du signal simulé est moins "aplati" que dans la réalité.

4.6 Récapitulatif

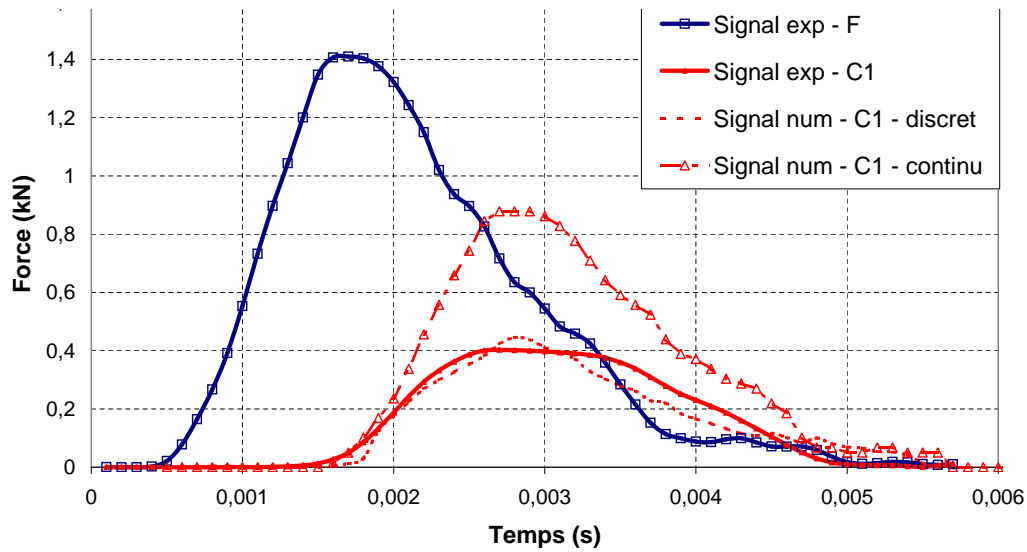


Figure 4.39 – Comparaison des résultats des simulations discrète et continue - 15 cm de ballast foisonné - hauteur de chute de 30 cm

4.6 Récapitulatif

4.6.1 Contexte

Ces comparaisons permettent de voir l'évolution du signal à travers une couche de 15 et de 30 cm de ballast afin de mieux comprendre les phénomènes dynamiques et d'apprécier la pertinence des méthodes de modélisation continue et discrète.

4.6.2 Résultats expérimentation

Masse volumique Le plot restreint de ballast présente comme valeur de masse volumique pour le plot foisonné, $1,51 \text{ t/m}^3$, et $1,63 \text{ t/m}^3$ pour le plot compacté.

Amortissement Le signal est fortement amorti sur le capteur déporté. Dans ce contexte nous avons privilégié principalement l'étude des données du capteur C1 à l'aplomb de la source.

Le ballast amortit d'autant plus l'effort que l'épaisseur de ballast est conséquente. Il atteint une valeur moyenne de $72,5 \% \pm 14$ avec 15 cm et de $85 \% \pm 2$ avec 30 cm de ballast compacté. Ce phénomène intervient avec une valeur plus faible de la mesure de vitesse à la source montrant l'effet de l'augmentation de l'épaisseur de ballast sur la réponse à la source, et de fait l'effet des réflexions parasites sur les bords du plot restreint.

En comparant les deux états de serrage du ballast sur les deux épaisseurs de ballast, les résultats montrent un amortissement plus fort dans le cas foisonné avec 15 cm (amortissement du ballast foisonné plus faible de 22,5 %) alors qu'avec 30 cm de ballast foisonné, l'amortissement est plus conséquent dans le cas compacté (amortissement du ballast compacté plus faible de 7 %). Des phénomènes complexes interviennent sur la propagation dans la transmission des efforts. Il est important de rappeler qu'il y a moins de réflexions avec une épaisseur plus grande.

Avec une épaisseur de 30 cm de ballast les écart-types de mesure sont plus faibles. Néanmoins la variabilité de la mesure reste conséquente lorsque l'on fait des essais de reproductibilité. Ces essais ont pour conséquence de modifier les contacts entre les éléments de ballast conduisant à des chemins préférentiels aléatoires non dépendant de l'état de serrage.

L'amortissement est de 12 % plus faible sur 15 cm de ballast foisonné par rapport à une épaisseur de 15 cm de ballast compacté. Néanmoins les résultats ne conduisent pas toujours à un amortissement plus conséquent sur le ballast foisonné, ce qui montre des phénomènes complexes intervenant sur la propagation dans la transmission des efforts.

Il apparaît que le ballast amortit d'autant plus l'effort que l'épaisseur de ballast est conséquente. Il atteint une valeur moyenne de 71 % avec 15 cm et de 87 % avec 30 cm de ballast foisonné. Ces résultats montrent la non linéarité de ce milieu. Des phénomènes complexes influencent la propagation dans la transmission des efforts.

Avec une épaisseur de 30 cm de ballast les écarts-types de mesure sont plus faibles. Néanmoins une variabilité de la mesure reste conséquente lorsque l'on fait des essais de reproductibilité. Ces essais ont pour conséquence de modifier les contacts entre les éléments de ballast conduisant à des chemins préférentiels aléatoires indépendants de l'état de serrage.

Vitesse du ballast La vitesse de propagation mesurée dans le ballast est comprise entre 90 ± 8 m/s (30 cm de ballast compacté avec plaque posée et scellée) et 220 ± 15 m/s (15 cm de ballast compacté épaisseur avec plaque posée) suivant la modalité.

Reproductibilité Avec une épaisseur de 30 cm de ballast les écarts-types de mesure sont plus faibles. Néanmoins une variabilité de la mesure reste conséquente lorsque l'on fait des essais de reproductibilité. Ces essais ont pour conséquence de modifier les contacts entre les éléments de ballast conduisant à des chemins préférentiels aléatoire non dépendant de l'état de serrage.

4.6 Récapitulatif

Force mesurée L'effort transmis est plus conséquent à l'aplomb de la sollicitation (environ 25 % en plus) plutôt qu'au niveau du capteur déporté de 25 cm par rapport à la source. Ce même constat a été fait avec les résultats de vitesse de propagation.

Sur une épaisseur de 15 cm de ballast, l'effort est amorti de 75 % alors qu'avec 30 cm de ballast, il est amorti de 85 %. L'augmentation de l'épaisseur de ballast conduit à avoir une dispersion des chaînons de force suite à un trajet plus long. L'effort à la source est plus faible de 10 % avec 30 cm plutôt qu'avec 15 cm pour une même hauteur de chute ce qui montre l'effet de l'augmentation de l'épaisseur de ballast.

La normalisation des enregistrements montre le caractère non linéaire du ballast étant donné que les courbes normalisées ne sont pas confondues.

Fréquence L'utilisation d'un élastomère conduit à filtrer les signaux sismiques, ce qui amène à un enregistrement en forme de gaussienne. La fréquence prépondérante du signal a ainsi été estimée à 140 Hz. Les spectres fréquentiels indiquent un amortissement fréquentiel plus conséquent sur le capteur déporté par rapport au capteur à l'aplomb de la sollicitation, montrant ainsi l'augmentation du parcours des ondes, ce qui était attendu.

4.6.3 Simulation continue

La couche de ballast de 30 cm d'épaisseur est la taille minimale pour garantir le critère d'homogénéité, ce qui montre que la configuration avec une épaisseur de 15 cm de ballast peut générer une dispersion.

Des réflexions parasites sont prévisibles sur les bords du modèle. Néanmoins les réflexions parasites interviennent après le pic maximal du choc, ce qui ne perturbe pas la réponse du pic.

Il pourrait être intéressant de considérer par la suite des frontières absorbantes pour le modèle avec une épaisseur de 15 cm de ballast afin de valider le modèle continu. L'effet de la taille du maillage sur la propagation est un paramètre qui pourrait être traité en parallèle afin de visualiser ces réflexions parasites.

4.6.4 Simulation discrète et comparaison avec la modélisation continue et l'expérimentation

Les forces calculées numériquement au moyen d'un modèle discret sur le capteur situé à la base du ballast coïncident bien avec les mesures expérimentales : la différence entre les maxima n'excède pas 15 % et la forme des deux courbes est très similaire. Les courbes expérimentales apparaissent néanmoins

plus arrondies que celles calculées. La différence d'amortissement entre la simulation discrète et l'expérimentation va de 7 à 14 % suivant la hauteur de chute de masse. Cette modélisation discrète donne des résultats proches de la réalité avec des hauteurs de chute allant de 30 à 100 cm conduisant à une variation de 2 à 6 % d'amortissement.

La représentation des mesures avec les deux simulations indique que le modèle discret se cale mieux à la réalité avec une variation d'amplitude par rapport aux mesures expérimentales de quelques % tandis que la modélisation continue conduit à des résultats à la base du ballast pas assez amortis avec une valeur deux fois plus grande que les valeurs mesurées.

Dans les deux cas de modélisation, la forme du signal simulé est moins 'aplatie' que dans la réalité d'où le rôle de filtre fréquentiel de l'élastomère.

4.7 Conclusion

Les travaux des chapitres 3 et 4 ont conduit à étudier la propagation d'ondes sismiques dans le ballast ferroviaire en réalisant de nombreux dispositifs expérimentaux. Afin de compléter la connaissance des paramètres, il est nécessaire de comprendre les phénomènes au moyen de modélisation de faible dimension en vue d'étudier la faisabilité de représenter du ballast par un milieu continu et par un modèle discret pour une configuration d'essais simplifiée.

Le dispositif expérimental utilisé pour comparer les modèles est de faible dimension. Il ne reflète pas la réalité d'une structure ferroviaire étant donné que la couche sous-jacente au ballast est rigide alors que la souplesse de la sous-couche influence fortement le comportement du ballast. Ce dispositif permet néanmoins de réaliser une analyse en conditions contrôlées en limitant le temps de calcul (dimensions réduites).

Suivant l'échelle à laquelle on représente le phénomène, il est envisageable de représenter le ballast avec un modèle continu et un modèle discret. Dans la littérature, de nombreuses études numériques ont ainsi été réalisées sur les milieux discrets avec des approches continues et discrètes.

Les résultats de l'expérimentation du plot restreint montrent que l'amortissement du ballast est régi par des phénomènes complexes ne répondant pas à un comportement de milieu continu. En effet, dans certains cas, le ballast foisonné amortit moins que le ballast compacté. La non linéarité de ce matériau est mise en évidence dans les essais. Le caractère discret du ballast conduit à une variabilité importante des essais de reproductibilité. Les contacts entre les éléments de ballast sont des chemins préférentiels aléatoires donnant ainsi un caractère difficilement prévisible au résultat. La vitesse de propagation du

4.7 Conclusion

ballast obtenue dans ces essais est plus faible que dans les expérimentations à grande échelle du chapitre 3 de 90 à 220 m/s dans ce plot restreint et de 220 à 300 m/s dans les planches expérimentales.

Les forces calculées au moyen de la modélisation discrète reflètent bien la réalité. Néanmoins, il convient d'intégrer le résultat de la valeur en entrée du modèle pour voir si l'on arrive à simuler la fonction de transfert comme dans le cas continu.

Les paramètres renseignés dans la modélisation discrète ne permettent pas de se rapprocher de ceux de l'expérimentation. Ce volet numérique permet de comprendre les données importantes pour modéliser une couche de ballast avec un modèle continu et un modèle discret. Ce travail est une ébauche et nécessiterait d'être approfondi. Dans les deux cas, la forme du signal simulé reflète un milieu plus rigide que dans la réalité (pente du signal plus forte).

Avec une épaisseur de 15 cm, le ballast amortit plus dans le cas foisonné alors qu'avec 30 cm, le cas compacté amortit plus. Ce résultat est cohérent avec les mesures du chapitre 3. Il confirme le caractère aléatoire de la réponse dynamique d'une couche de ballast.

Ces simulations permettent d'approcher la difficulté de modéliser une couche de ballast. En effet la taille des granulats de ballast (VER) et l'épaisseur de ballast conduit pour la couche de 15 cm à un rapport pas suffisamment important pour se placer dans un contexte de modèle continu.

Cette étude pourrait être poursuivie avec une étude paramétrique plus poussée afin d'aboutir à un signal modélisé de forme correcte. De plus, elle pourrait être complétée dans un second temps par un modèle avec des couches absorbantes afin de valider les résultats de ces modélisations. En parallèle, il conviendrait d'étudier l'effet du maillage sur la propagation.

Conclusion et perspectives

La connaissance de l'infrastructure des voies ballastées nécessite de faire appel à la mécanique des milieux granulaires non linéaires. Plus généralement, la connaissance des paramètres de variabilité définissant l'infrastructure ferroviaire passe par les deux approches de modélisation de la voie (milieux continus et discrets).

Les différentes expérimentations menées au CER montrent que la propagation au sein du ballast est complexe.

Les résultats d'amortissement global du signal sismique mais aussi la réponse du premier mode des courbes de dispersion ne permettent pas de trouver un indicateur mesurable pour étudier la compacité du ballast tant la mesure est dispersée sur le ballast et tant l'écart mesuré est faible et peu discriminant.

Néanmoins, la mesure de vitesse de propagation sur le ballast, la réponse du second mode des courbes de dispersion ainsi que l'amortissement fréquentiel peuvent être des traitements mettant en évidence qualitativement des zones de faiblesse d'état de serrage. Cette étude expérimentale nécessite un travail complémentaire afin de quantifier la valeur de compacité par ces méthodes de propagation d'ondes sismiques après calage des paramètres. Les travaux de KGS⁵ montrent un avenir prometteur de ces méthodes en automatisant l'installation de géophones sur un véhicule d'auscultation ferroviaire afin de quantifier la propagation des ondes sismiques.

L'instrumentation déployée sur le ballast (expérimentations du chapitre 3) indique qu'il convient de mettre un nombre suffisant de capteurs, fixés à 24, pour atteindre une bonne résolution des courbes de dispersion et aussi pour visualiser les vitesses de l'hodochrone. Étant donné que le ballast est un milieu très amortissant, il convient de prendre, avec des sources faiblement énergétiques, un offset à la source de 25 cm. De plus, l'épaisseur à ausculter étant au maximum de 60 cm sur voie, l'écartement préconisé entre géophones doit être de 15 cm. Il convient nécessairement de sceller au plâtre les capteurs afin de garantir une réponse moyennée permettant d'avoir une représentation des phénomènes dans leur globalité ne dépendant pas du caractère aléatoire lié aux chaînons de force du ballast ferroviaire.

Les méthodes sismiques classiques ont été étudiées en regardant la variation des vitesses de propagation dans un ballast compacté et dans un ballast non compacté, ceci pour les ondes de compression mais aussi pour les ondes de surface en déterminant les courbes de dispersion du ballast. La vitesse de propagation, V_P , dans le ballast a été mesurée à 210 ± 20 m/s dans le bal-

5. Kansas Geological Survey

last foisonné et à 300 ± 40 m/s dans le ballast compacté. Cette variation de 30 % peut être suffisante pour quantifier la compacité du ballast. La fréquence prépondérante des différentes sources utilisées est comprise entre 100 et 250 Hz.

La comparaison de la propagation de l'onde vibratoire dans le ballast, milieu discret, avec celle dans un milieu continu type sable sur une expérimentation de mêmes dimensions géométriques, montre une moins bonne résolution des résultats sur le ballast et des résultats plus aléatoires.

En complément de l'étude du serrage du ballast ferroviaire, ces mesures ont mis en évidence l'intérêt des méthodes sismiques pour le suivi de la mise en œuvre du ballast par couche de 30 cm, la vitesse de l'onde réfractée étant fonction de l'épaisseur de ballast. Plus l'épaisseur est importante plus la vitesse de l'onde réfractée diminue.

Afin de compléter la connaissance des paramètres nécessaires à la compréhension des phénomènes, un volet complémentaire de simulation numérique permet de valider la représentation du ballast par un milieu continu et par un modèle discret pour une configuration d'essais simplifiée. Le dispositif expérimental utilisé pour comparer les modèles est de faible dimension. Il ne reflète pas la réalité d'une structure ferroviaire étant donné que la couche sous-jacente au ballast est rigide alors que la souplesse de la sous-couche influence fortement le comportement du ballast. Ce dispositif permet néanmoins de réaliser une analyse en conditions contrôlées en limitant le temps de calcul (dimensions réduites). Suivant l'échelle à laquelle on représente le phénomène, il est envisageable de représenter le ballast avec un modèle continu et un modèle discret.

Les résultats de l'expérimentation du plot restreint utile pour la modélisation ont confirmé la complexité du milieu observé sur les expérimentations en vraie grandeur. En effet, dans certains cas, le ballast foisonné amortit moins que le ballast compacté. Le caractère discret du ballast conduit à une variabilité importante des essais de reproductibilité. Ces essais ont permis de visualiser la non-linéarité de ce matériau. La vitesse de propagation du ballast obtenue dans ces essais aux dimensions restreintes est plus faible que dans les expérimentations à grande échelle du chapitre 3 : de 90 à 220 m/s dans ce plot contre 220 à 300 m/s dans les planches expérimentales. Ce constat peut provenir de l'utilisation intermédiaire d'un élastomère qui amortit l'onde. Les vitesses des ondes des planches expérimentales à l'échelle 1 sont donc plus représentatives de la réalité. Ce volet numérique permet de comprendre les données importantes pour modéliser une couche de ballast avec un modèle continu et un modèle discret.

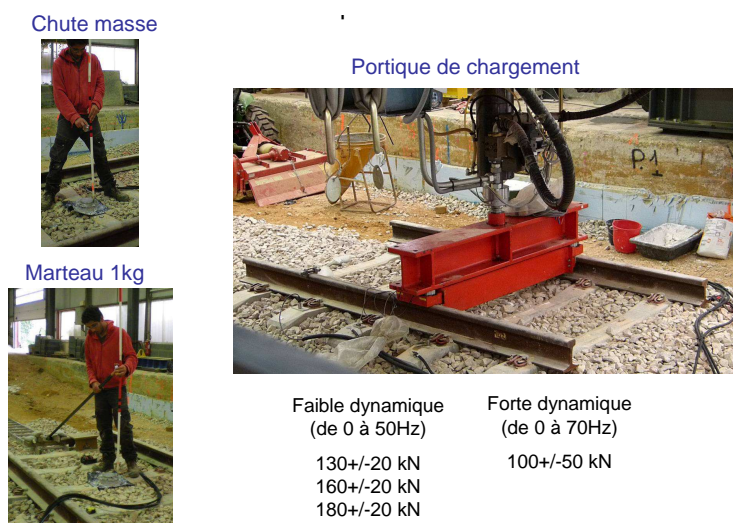
Ce travail est une ébauche et nécessiterait d'être plus approfondi. Dans les deux cas, la forme du signal est moins aplati que dans la réalité. De plus, les

4.0 Conclusion et perspectives

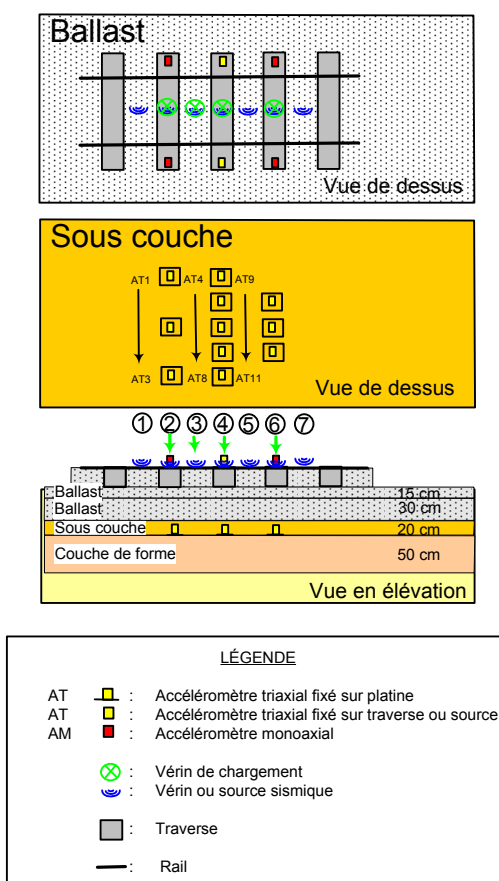
paramètres d'amortissement de la modélisation continue sont difficiles à caler pour le ballast en prenant des hypothèses de milieux continus. Les courbes en entrée et en sortie ne sont ainsi pas cohérentes avec l'expérimentation. Concernant les résultats du milieu discret, la courbe à la base de la couche de ballast reflète bien le résultat escompté. Il convient néanmoins de poursuivre cette modélisation en intégrant dans le calcul les résultats en entrée du ballast en parallèle de ceux à la base du ballast.

De nombreuses perspectives d'étude sont envisagées à l'issue de ces premiers travaux avec :

- le traitement sismique d'enregistrements de bruit de fond généré avec des méthodes type crosscorrélation (annexe B.6) et par analyse de la coda (Larose, 2006). Les essais préliminaires de crosscorrélation de l'annexe B.6 montre des résultats intéressants. De plus, les nombreuses mesures mettent en évidence la diffraction des ondes dans le ballast ce qui est un paramètre prépondérant sur l'analyse de la coda. Il convient de quantifier le paramètre de compacité par ces méthodes pour l'étude du serrage du ballast ferroviaire.
- de traiter les essais complémentaires (figure 4.40) qui ont été réalisés sur une structure expérimentale à l'échelle 1 utilisant des sources faiblement (marteau V et chute de masse) et fortement (portique de chargement simulant le passage d'un train) énergétiques sur un panneau de voie instrumenté au moyen d'accéléromètres triaxiaux positionnés à chaque extrémité de la traverse afin de discriminer un indicateur quantitatif de la réponse des traverses en fonction de l'état de serrage du ballast ferroviaire et de son épaisseur.
- de traiter les données d'une étude fréquentielle réalisée au moyen d'un vibreur inertiel pour connaître la signature du ballast et entre autre l'influence du paramètre fréquence.



(a) Photographie des essais réalisés restant à traiter



(b) Schéma de l'instrumentation

Figure 4.40 – Essais complémentaires avec un panneau de voie

Compléments sur les notions fondamentales

A.1 Défauts géométriques

A.1.1 Matériel d'auscultation pour les lignes classiques

La qualité de la voie des lignes classiques est évaluée au moyen d'indicateurs mesurés par des voitures d'enregistrement appelées voiture Mauzin (figure A.1¹).

Ce véhicule est équipé de 3 boggies et d'une caisse extrêmement rigide qui permet de servir de plan de référence pour toutes les mesures. Le Mauzin délivre 8 points de mesures pour le plan vertical et 3 pour le plan horizontal, comportant à la fois les défauts du tracé de la voie (figure A.2) et les mouvements propres au véhicule. Les valeurs moyennes obtenues sont comparées à des valeurs de référence. Différents défauts géométriques ponctuels de la voie peuvent être mesurés :

- le nivellement longitudinal NL correspondant sur une longueur de référence de voie de 12,2 m à une dénivellation locale sur chaque file de rail par rapport au profil moyen de la voie,
- le nivellement transversal NT ou l'écart de dévers correspondant à la différence entre le dévers mesuré et le dévers théorique entre les deux files de rail,

1. nom tiré de son inventeur André Mauzin, ingénieur en chef de la SNCF et directeur de la Section d'essais et Recherche de la SNCF (Direction du Matériel) jusqu'en 1966



Figure A.1 – Photographie d'une voiture Mauzin

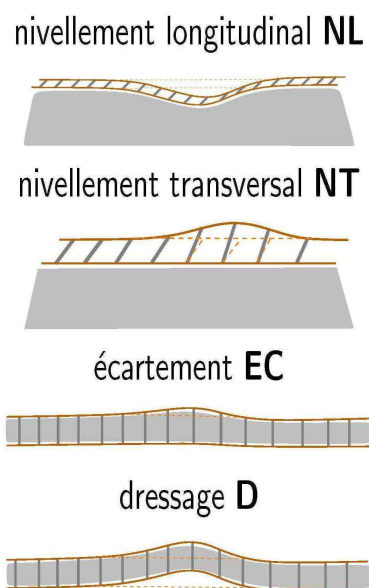


Figure A.2 – Différents types de défauts ponctuels de géométrie de la voie - [Meier Hirmer, Carolina \(2009\)](#)

- le défaut horizontal défini sur une base de 10 m de voie composé de deux types de défaut : l'écartement EC d'un rail par rapport à l'autre ou le dressage D des deux rails par rapport au tracé de la voie conduisant à un écartement des 2 files de rail.

Pour chaque mode de dégradation et pour différentes longueurs de défaut, il existe des indicateurs mesurables qui permettent d'exprimer quantitativement la dégradation.

Il est alors possible de détecter les défauts ponctuels, présentés dans la figure A.2, mais également les défauts à grande longueur d'onde ou encore l'accumulation de plusieurs défauts sur un même tronçon. On distingue ainsi l'indicateur "Mauzin classique" de l'indicateur "Mauzin synthétique" qui définissent des niveaux de sécurité différents.

Les valeurs de Mauzin synthétique sur 1 km étaient les seules au début de l'exploitation. Elles disposent donc d'un historique plus important.

Le Mauzin synthétique permet, d'une part de suivre l'évolution de la qualité globale de la géométrie de la voie, d'autre part de programmer les travaux continus de correction lorsqu'ils concernent une zone de voie étendue.

A.2 Véhicule mesurant les paramètres de raideur déflexion

Tableau A.1 – Définition des niveaux de sécurité et du nom associé suivant la taille des défauts

Mauzin	Type de défauts	Critères
Classique	Ponctuels	Sécurité
Allongé	30 mètres	Sécurité / confort
Synthétique	200/1000 mètres	Qualité

A.1.2 Matériel d'auscultation pour les lignes à grande vitesse

La fréquentation des lignes TGV a doublé en quelques années. L'entretien de ces voies est un véritable défi, car il s'agit de prévenir, réparer et surveiller les lignes en un temps record, tout en maintenant la circulation. L'auscultation des lignes à grandes vitesses est réalisée au moyen de voiture d'essais à grande vitesse (VEGV) nommée communément Mélusine. Ces matériels sont utilisés par la SNCF pour les établissements de maintenance du matériel (EMM, EIMM). Depuis juin 2006, la direction de l'infrastructure de la SNCF possède un outil de pointe pour la détection des défauts. L'IRIS 320 est une rame TGV unique au monde comprenant 8 voitures. Elle a été modifiée par la SNCF afin de surveiller et de mesurer en temps réel les caractéristiques de l'infrastructure ferroviaire des lignes classiques, et surtout des lignes à grande vitesse. La rame peut faire ses mesures, à la vitesse d'exploitation de la ligne, et jusqu'à 320 km/h, d'où son nom IRIS320.

A.2 Véhicule mesurant les paramètres de raideur déflexion

Pour améliorer l'entretien et la sécurité des voies ferroviaires, des centres de recherches ferroviaires ont développé des techniques de mesure en continu de la raideur des voies (rapport de la charge verticale appliquée sur la déflexion de la voie). En effet, c'est l'une des caractéristiques les plus importantes d'une voie. Une raideur verticale insuffisante de voie peut provoquer des problèmes de fatigue du rail, alors qu'une voie trop raide peut avoir une émission importante de bruit et d'usure des roues et des rails. C'est pourquoi déterminer la raideur verticale d'une voie est extrêmement important afin d'exécuter au bon moment l'entretien de la voie.

Certains engins réalisent des mesures statiques où le véhicule est à l'arrêt

ou à très faible vitesse de l'ordre de 16 km/h (Ex. en Suède avec le TLV Banverket, Track Loading Vehicle ou véhicule de chargement de voie, en Chine avec CARS et USA avec le TTCI) et d'autres des mesures dynamiques avec un système de roue mobile chargeant la structure pouvant rouler à une vitesse de 30 km/h (En Suède avec le RSMV de Banverket, [Berggren \(2005\)](#) et en France avec le portancemètre ferroviaire, [Hosseingholian \(2007\)](#)).

La raideur de la structure est une mesure globale de la voie ferrée. Elle ne permet pas de déterminer l'origine exacte de la dégradation dans la structure (superstructure, infrastructure). Néanmoins elle reste une valeur importante car la variation de cette mesure peut être un indicateur de dégradation de la voie.

[Selig & Waters \(1994\)](#) suggèrent qu'un module équivalent à 28 MPa permet d'assurer une bonne performance sur la voie. Ceci correspond à une raideur k de 55 kN/mm de rail type UIC 60. En Espagne, les études conduisent à définir une valeur non courante pour des voies à grande vitesse de 70 kN/mm . L'inverse de la raideur de la voie est appelé réceptance (α) ou flexibilité dynamique. Elle est utilisée de préférence car la plupart des systèmes sont pilotés en force. Le phénomène de résonance est ainsi interprété avec la déflexion. Elle est souvent décrite par une amplitude et une phase.

A.2.1 Défectométrie de la voie (HSD)

La technique de défectographe à grande vitesse (High Speed Deflectograph) utilisée dans le domaine routier reste à développer pour des applications ferroviaires.

Son principe est basé sur la mesure au moyen de lasers de :

- la déflexion entre un point de référence et le champ de déflexion maximal,
- la vitesse de déflexion entre deux points du champ de déflexion.

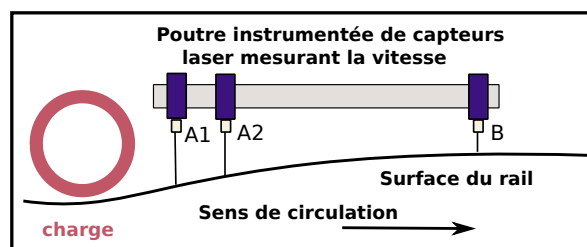


Figure A.3 – Principe de mesure du défectographe à grande vitesse

A.3 Épaisseur de la voie

Le géoradar, aussi appelé radar géologique ou encore GPR (Ground Penetrating Radar), est une méthode d'imagerie à haute résolution pour investiguer les sols de surface et de subsurface (figure A.4). Il est de plus en plus utilisé sur la voie ferrée. Il permet de traduire les conditions existantes de l'infrastructure (ballast, sous-couche et sol support).



Figure A.4 – Radar GPR - [Fateh \(2005\)](#); [De Bold,Robert \(2011\)](#)

Le principe de fonctionnement est basé sur des impulsions électromagnétiques très courtes émises par une antenne, qui se réfléchissent sur les interfaces de matériaux présentant des propriétés diélectriques différentes (conductivité σ , permittivité relative ϵ_r). Une antenne réceptrice enregistre les signaux réfléchis jusqu'à la surface. La propriété électromagnétique principale des couches est la permittivité diélectrique, qui est une fonction de la densité, de la teneur en eau et du type de matériel.

Chaque couple d'antenne (émettrice, réceptrice) fonctionne sur une bande de fréquence définie, que l'on caractérise par sa fréquence centrale. On distingue deux types d'antennes, selon la présence ou non d'un blindage. Les antennes non blindées émettent par défaut aussi bien dans l'air que dans le sol et sont donc sensibles à la présence de réflecteurs au dessus de la surface du sol. Pour limiter ces perturbations, des antennes dites blindées ont été développées de manière à focaliser l'énergie des ondes émises en direction du sol. La vitesse V de ces ondes est particulièrement intéressante car elle détermine, avec la fréquence centrale f de l'antenne utilisée, la longueur d'onde λ des signaux émis dans le sol, ($\lambda = v/f$). Elle permet également une conversion temps/profondeur des profils radar.

Pour les applications ferroviaires, le GPR est monté sur une draisine circulant à vitesse normale. La configuration de l'antenne et les procédures d'inspection sont optimisées pour limiter l'influence des traverses et du rail. Les antennes sont localisées aux deux extrémités des traverses et au centre de la

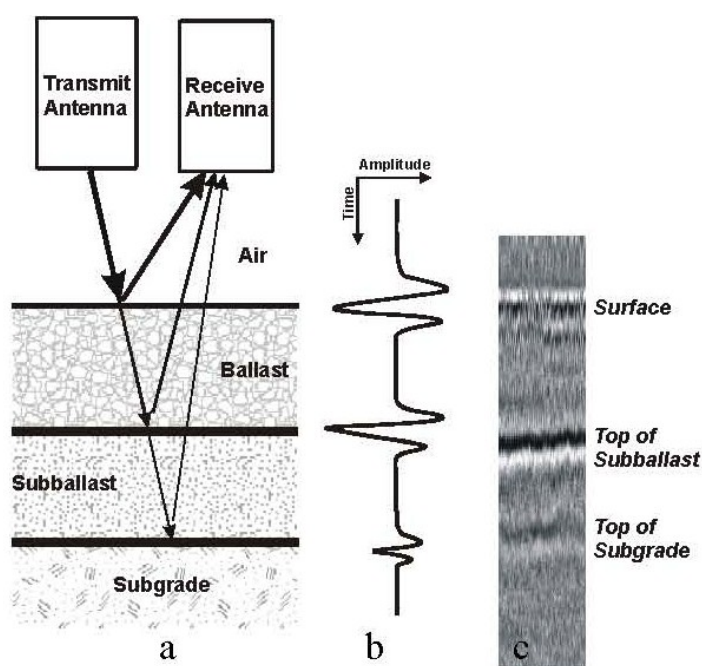


Figure A.5 – Principe de fonctionnement du radar GPR, [Fateh \(2005\)](#)

voie, environ à 25 centimètres au niveau du rail.

Les signaux sont visualisés en 2 dimensions sur des radargrammes sous forme d'échelle de gris pour les analyses. Ils donnent des indications sur :

- l'épaisseur des couches,
- la teneur en eau et les densités du ballast, de la sous-couche et du sol support,
- l'état du ballast (pollution, densité),
- les problèmes de drainage (visualisation de l'eau bloquée),
- les interstices, et les autres hétérogénéités,
- les couches non uniformes et déformées, et les variations transversales des conditions de l'infrastructure de la voie (par antennes multiples),
- les variations des conditions longitudinales, transversales et en profondeur de la voie, et indiquant les différentes performances de la voie.

La précision de l'interprétation des images du radar est le principal problème et l'obstacle clé à l'usage plus large de cette méthode. Le Système de Positionnement Global (GPS) de Haute Précision fournit les données pour déterminer l'emplacement de la voie, son alignement, et son déplacement, et sert à l'entretien. Les données de la trajectoire et du déplacement de la voie peuvent être stockées dans une base de données SIG.

A.4 Densité en place

Quelques-unes des plus importantes caractéristiques du système GPR sont :

- la fréquence d'exploitation de 16 à 2500 MHz,
- la fréquence d'échantillonnage de 100 Hz,
- la vitesse de roulement de 180 km/h, (chaque pas de 0,5 m peut être mesuré),
- la profondeur de pénétration de 10 m (à 100 MHz) ou de 3 m (à 500 MHz).

A.4 Densité en place

A.4.1 Gammadensimètre

Cet essai donne une densité moyenne pour une profondeur donnée. Il consiste à introduire, dans un trou préalablement foré, une source radioactive (CS137 de 70 mCi d'activité) située à l'extrémité inférieure d'une pointe. Cette dernière émet un rayonnement gamma qui est réceptionné en surface au moyen de compteurs Geiger. Une relation lie le nombre de comptage de photons avec la densité du sol. Plus le nombre est important moins le matériau est dense. Suivant l'utilisation (terrassement, chaussées) et l'épaisseur de la couche auscultée, il existe plusieurs gammadensimètre à profondeur variable (figure A.6) :

- GPV 25/40, mesure la densité de 25 à 40 cm de profondeur,
- GPV 10/22, mesure la densité de 10 à 22 cm de profondeur,
- GPV 3/8, mesure la densité de 3 à 8 cm de profondeur.

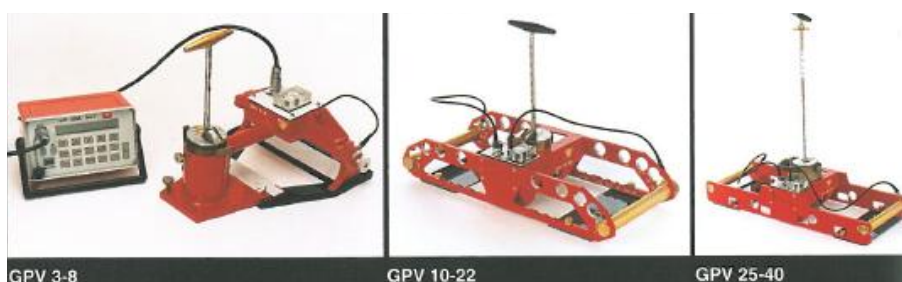


Figure A.6 – Gammadensimètre à profondeur variable

Ces appareils mesurent la masse volumique humide moyenne pour une hauteur donnée. Il est nécessaire de coupler à cet essai une mesure de teneur en eau pour obtenir la masse volumique sèche. Ce matériel est conforme à la réglementation en radioprotection. Il n'est pas adapté pour une mesure dans le ballast pour la sécurité des utilisateurs. Le ballast est en effet rempli de vide laissant passer les rayonnements gamma.



Figure A.7 – Photographie du matériel de double sonde GDS200

A.4.2 GDS200

La double sonde gamma (figure A.7) est un appareil permettant d'obtenir un gradient de densité sur une profondeur d'environ deux mètres entre deux forages tubés. L'essai consiste à descendre deux tubes de guidage rigide en PVC, l'un pour insérer la source radioactive et l'autre pour le compteur Geiger. Chaque mesure est faite pour une profondeur donnée avec la source et le compteur, positionnés face à face dans ces deux trous parallèles. Le principe physique est le même que pour les gammadensimètres, à la différence près qu'une série de mesures sera réalisée avec un pas donné jusqu'à la profondeur choisie. Une correction est réalisée en fonction de l'écartement entre les tubes (mesure entre piges) suivant le théorème de Thalès.

A.4.3 Densitomètre poids / volume

La méthode poids/volume consiste à creuser un trou dans le terrain compacté : les matériaux extraits sont séchés en laboratoire puis pesés, et le volume du trou est mesuré sur site. Le densitomètre à sable est un appareil rempli d'un sable bien sec dont la densité est fixe, que l'on écoule dans le trou du sol à contrôler. Par pesée avant et après du densitomètre à sable, il est possible de déterminer la quantité de sable placée dans le trou. Le poids sec du matériau extrait du trou est déterminé en laboratoire, ce qui permet de calculer la densité sèche du matériau compacté. Cette méthode de mesure de la densité au moyen du densitomètre à sable donne des résultats précis, mais elle est assez longue car il faut multiplier les points de mesure pour avoir une densité sèche moyenne du massif compacté. Pour cela, cette méthode est maintenant très peu utilisée.

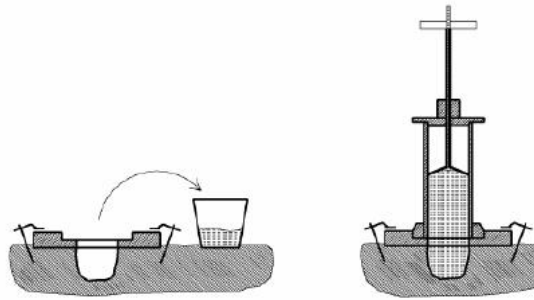


Figure A.8 – Principe de mesure du densitomètre à membrane

Le densitomètre à membrane (figure A.8²) est constitué d'un cylindre rempli d'eau, fermé à sa partie supérieure par un piston et à sa partie inférieure par une membrane souple. La mesure se déroule en deux phases : une première pendant laquelle on applique la membrane sur le sol à l'endroit où sera effectué le trou pour mesurer un premier volume ; ensuite, après avoir creusé le trou et récupéré les matériaux, l'appareil est replacé à l'emplacement de départ et le piston est enfoncé afin d'appliquer la membrane contre les parois du trou. On effectue ainsi une deuxième lecture de volume et, par différence avec la première, on détermine le volume du trou.

A.4.4 Pénétromètres dynamiques

Les méthodes indirectes consistent à relier un paramètre mécanique mesuré in situ avec la densité sèche. Dans le domaine du contrôle de compactage, les recherches effectuées ont permis de relier la valeur de la résistance de pointe mesurée au moyen d'un pénétromètre dynamique, à la valeur de la densité sèche en fonction de la profondeur.

Parmi les instruments les plus utilisés dans ce domaine, on peut citer le pénétromètre dynamique PDG1000 (figure 50) et le pénétromètre dynamique léger PANDA (voir Figure 52).

Le PDG 1000 est un pénétromètre dynamique conçu par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. L'essai consiste à enfoncer par battage un train de tiges métalliques de section déterminée. Le battage s'effectue à l'aide d'un mouton qui tombe en chute libre d'une hauteur calibrée. La résistance dynamique de pointe peut être déterminée pour chaque profondeur à partir de la mesure effectuée d'enfoncement par coup. L'appareil est équipé d'une instrumentation et d'un système permettant l'acquisition informatisée des données. De nombreuses études expérimentales, effectuées au Centre d'Expérimentation et de Recherche de Rouen (CER), ont permis d'établir les relations densité-

2. <http://www.agepar.net/document/ArticleDakar-Khemakhem.pdf>

enfouissement par coup de la pointe pénétrométrique pour les différentes classes de sols définis par la classification GTR. Ces études ont permis d'établir les droites limite et de référence, pour chaque sol de la classification GTR. L'essai pénétrométrique peut alors être interprété en termes de qualité de compactage pour chaque coup de mouton, sous réserve d'avoir procédé aux différents essais d'identification des sols.



Figure A.9 – Pénétrömètre dynamique PGD1000

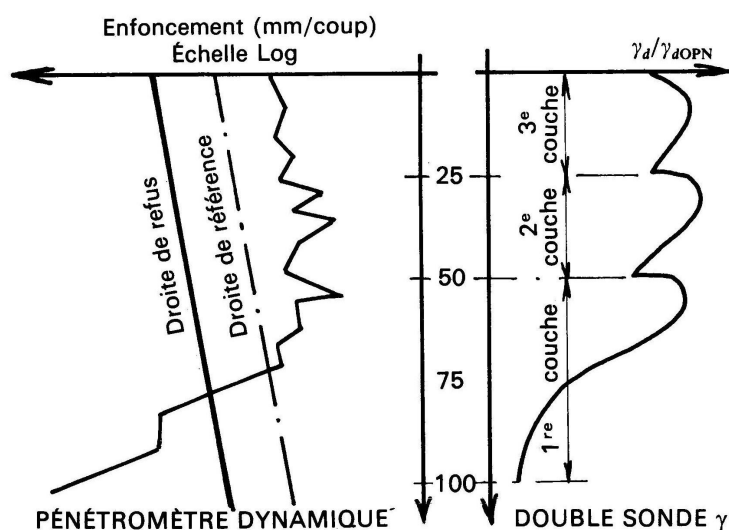


Figure A.10 – Comparaison de résultats au pénétromètre et à la double sonde gamma

Le graphe de la figure A.4.4 montre deux courbes de forme similaire entre les résultats de la double sonde gamma et ceux du pénétromètre dynamique.

A.5 Défaut de la voie par l'essai d'excitation au marteau (HET)

Le PANDA (Pénétrromètre Autonome Numérique Dynamique Assisté – photographie de la Figure 52) est un pénétrromètre dynamique léger à énergie variable conçu au LERMES (Université de Clermont-Ferrand). Le principe de l'appareil consiste à enfoncer au moyen d'un marteau, un train de tiges de 14 mm de diamètre muni d'une pointe de 2 ou 4 cm de diamètre. La vitesse d'impact du marteau sur la tête et l'enfoncement du train de tiges sont mesurés et enregistrés à chaque coup. La résistance dynamique de pointe par coup est calculée automatiquement pour chaque coup de la même façon que pour le PDG 1000, à partir de la formule dite des hollandais.



Figure A.11 – Photographie du Panda

A.5 Défaut de la voie par l'essai d'excitation au marteau (HET)

L'essai d'excitation au marteau est une méthode d'auscultation ponctuelle de précision qui traduit l'élasticité verticale de la voie. Cet essai est recommandé suite à des problèmes récurrents associés aux hautes fréquences (> 200 Hz), tels le bruit et les vibrations. Des défauts de voie sur de faibles distances génèrent ainsi des phénomènes de bruit et vibration dommageables pour la structure et peuvent remettre en cause la sécurité. Cette méthode est beaucoup utilisée pour étudier les ouvrages d'art et fondations en béton. Le marteau est équipé d'un capteur de force et la tête du rail (ou la traverse ou le ballast) est munie d'un accéléromètre (ou d'un géophone). L'impact du marteau est généralement appliqué sur le rail. Néanmoins suivant ce que l'on recherche, il peut être possible d'impacter la traverse ou le ballast. Les mesures sont faites avec plusieurs chocs du marteau. La fonction de transfert est ainsi déterminée entre la force d'impulsion et l'accélération résultante.

$$FRF = \frac{\text{Spectre réponse géophone}}{\text{Spectre impact marteau}}$$

Afin de déterminer les propriétés dynamiques des supports de rail et des traverses, deux modèles sont utilisés :

- un modèle à deux degrés de liberté,

- un modèle de rail continu et de support discret.

Les deux modèles décrivent le comportement dynamique vertical de la voie ferrée. Il est à noter ici que le modèle à deux degrés de liberté fait usage de certains paramètres qui compensent l'absence de caractère continu de la voie dans ce modèle.

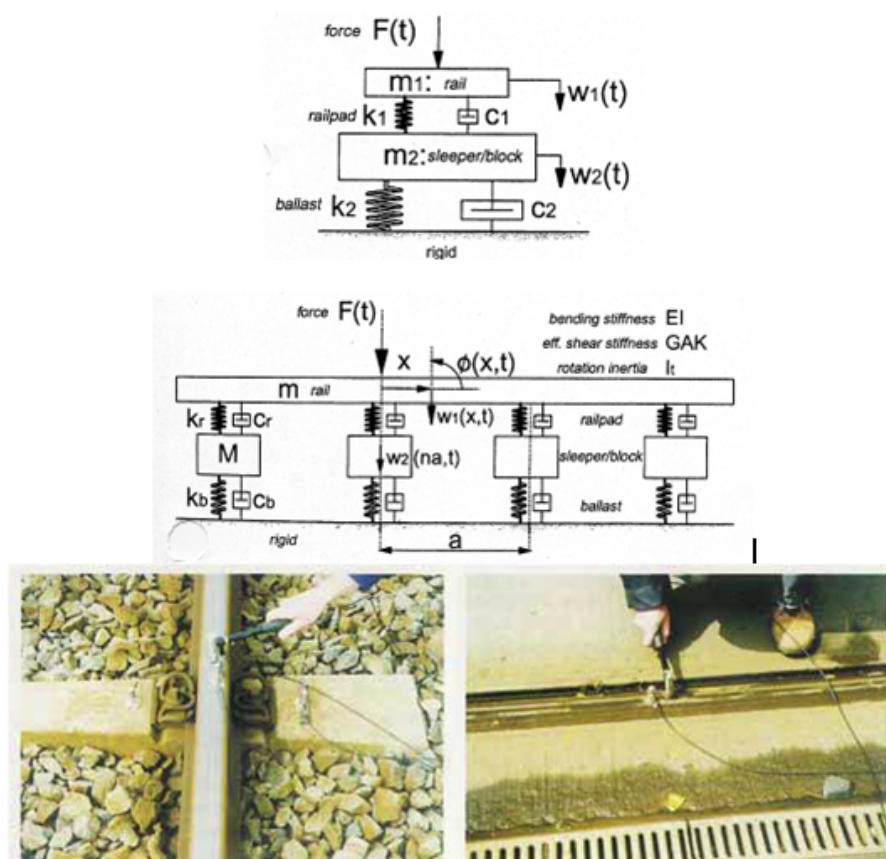


Figure A.12 – Test d'excitation au marteau (HET) ([Esveld, 2001](#))

L'évaluation au moyen de l'essai par excitation au marteau, concerne le comportement dynamique des structures de voies (figures [A.12](#) et [A.13](#)). Comme ces structures sont constituées de plusieurs composants, des caractéristiques s'appuient sur :

- les propriétés dynamiques telles que la raideur et l'amortissement (par exemple le rail, les caoutchoucs et le ballast),
- les propriétés d'inertie telles que la masse, la résistance et la raideur en cisaillement (par exemple les traverses),
- les propriétés géométriques telles que les dimensions structurales (par exemple la longueur des supports et leur espacement).

A.5 Défaut de la voie par l'essai d'excitation au marteau (HET)

La détermination du comportement dynamique est effectuée en mesurant à la fois l'intensité de l'impact sur la voie et les vibrations décroissantes en des points prédéfinis le long de la structure de la voie. L'impulsion engendre des vibrations d'une fréquence comprise entre 30 Hz et 3 kHz, selon le type d'impact. Les vibrations sont enregistrées au moyen d'accéléromètres (fréquences entre 10 Hz et 10 kHz, avec un filtrage des signaux à 20 kHz). Par la suite, on traite les signaux, afin que les fréquences de résonance puissent être rendues visibles. En supposant un comportement linéaire, la fonction de transfert en fréquences (FRF) annule les effets de type et d'amplitude de charge. La FRF peut varier de point en point si la voie est discrètement supportée, et également si ses propriétés dynamiques, inertielles ou géométriques spécifiques changent. Cela doit être pris en considération lors de la détermination de la qualité de la voie en des points spécifiques.

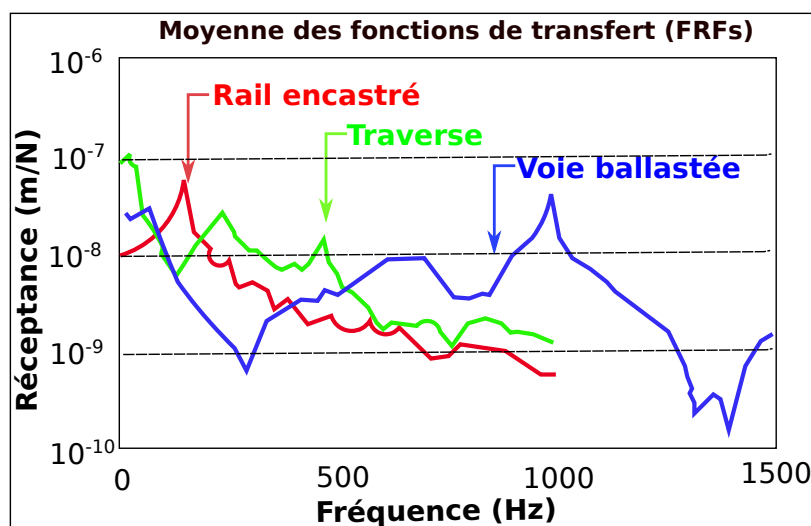


Figure A.13 – Exemple de réponse de l'essai d'excitation au marteau ([Esveld, 2001](#))

Les mesures de l'essai d'excitation au marteau sont utilisables pour :

- l'intégralité de la structure de la voie et de ses composants ou à un point spécifique pour déterminer un entretien particulier, donc minimiser la main d'œuvre et le remplacement des composants,
- un calcul spécifique de la voie afin de garantir sa qualité en ce qui concerne les paramètres caractéristiques spécifiques, et mieux connaître le comportement dynamique.

Les résonances visibles du système voie/véhicule se produisent dans la gamme 40 – 120 Hz.

Donc, l'essai par excitation au marteau constitue un outil précieux pour les entrepreneurs et les fabricants. La méthode de l'essai par excitation au

marteau a les avantages suivants :

- méthode d'essai ponctuelle et non destructive,
- méthode rapide pour déterminer des paramètres dynamiques de la voie pertinents,
- méthode pouvant être utilisée sans causer aucune gêne à la circulation.

La fonction de transfert en fréquences de l'inertance $H_A F$ [kg^{-1}] relie la force appliquée (entrée) F et les accélérations enregistrées sur la voie (sortie) A , par la sélection :

$$H_A F(f) = \frac{S_A F(f)}{S_F F(f)} \quad (\text{A.1})$$

avec les notations suivantes : $S_A F$ [Nm/s] est le spectre complexe d'accélération (sortie), $S_F F$ [N^2s] est le spectre de puissance de la force de l'impulsion (entrée), f [Hz] est la fréquence.

Parfois, il est aussi important d'analyser $H_X F$ [m/N] : fonction de transfert en fréquences de réceptance. Semblable à l'inertance elle relie la force appliquée (entrée) F et le déplacement résultant (sortie) X , elle s'écrit, d'après l'équation [A.2](#) :

$$H_X F(f) = \frac{S_A F(f)}{S_F F(f)} = \frac{1}{(2\pi f)^2} \frac{S_A F(f)}{S_F F(f)} \quad (\text{A.2})$$

$$S_X F(f) = (2\pi f)^{-2} S_A F(f) \quad (\text{A.3})$$

où $S_X F$ [mNs] est le spectre complexe du déplacement (sortie).

De l'équation [A.3](#), on peut relier l'inertance et la réceptance, la FRF peut être obtenue par :

$$H_A F(f) = (2\pi f)^2 H_X F(f) \quad (\text{A.4})$$

A.6 Maintenance du ballast

A.6.1 Bourrage mécanique du ballast

Une bourreuse (le terme exact est bourreuse-dresseuse-auto niveleuse, car les machines modernes remplissent ces trois fonctions, ce qui n'était pas le cas des premières machines) est un engin de travaux ferroviaires servant au positionnement de la voie et au compactage du ballast sous les traverses. Le principe du bourrage mécanique des voies a été inventé par Auguste Scheuchzer. On distingue les bourreuses de voie courante des bourreuses d'appareils de voie (communément appelés aiguillages, à tort). À la SNCF, il y a eu 2 types de bourreuses :

A.6 Maintenance du ballast

- les bourreuses d'appareils de voie du type 08-75 GV, où le symbole GV a pour signification Géométrie Variable,
- les bourreuses de voie courante du type 08-75 GS, où le symbole GS a pour signification Géométrie Simple.

La différence entre ces machines est le nombre de bourroirs. Sur les bourreuses GV il y a 8 bourroirs orientables. Le bourrage est la mise en place mécanique de ballast sous une voie par vibration, au moyen d'une bourreuse, afin de régler le profil en travers. La bourreuse est un engin permettant la mise à niveau de la voie. Cette opération consiste à lever la voie par l'intermédiaire des rails et à caler le ballast sous les traverses. Ce calage est réalisé mécaniquement et en continu par des engins dénommés "bourreuses mécaniques lourdes" qui positionnent avec précision, simultanément au calage, la voie dans son tracé. La machine agit par l'intermédiaire de pioches métalliques vibrantes, les bourroirs, qui sont plongées de chaque côté des traverses et qui compriment la couche de ballast par serrage mécanique. La double action vibratoire et compressive constitue le bourrage. Pour une optimisation il ne faut pas dépasser un temps de serrage de 2 secondes, Sur la photo de gauche on peut voir les bourroirs et sur celle de droite le système de préhension pour lever le rail.



Figure A.14 – Bourreuse mécanique lourde (photo Colas-Rail)

La plongée et la remontée des groupes de bourroirs se font par vérins hydrauliques. L'arête supérieure de la batte des bourroirs doit se trouver, en fin de plongée, à 10 mm sous l'arête inférieure de la traverse. Le serrage des éléments de ballast par les bourroirs sert à répartir la vibration sous la traverse et permet de compenser le vide dû au relevage de la voie. Ce serrage entraîne la filtration des éléments fins, et la correction des défauts. Le nombre de bourroirs est différent suivant le type de bourreuse :

- les bourreuses de type V-IC (voie courante, intervention continue), qui bourrent de 2 à 4 traverses à la fois suivant les modèles, sont équipées de 32 à 64 bourroirs ;
- les bourreuses de type V-IP (voie courante, intervention ponctuelle) ont en général 4 ou 8 bourroirs et ne traitent qu'une traverse à la fois ;

- les bourreuses de type A-IC (appareil de voie, intervention continue) sont équipés en général de 16 pioches et ne bourrent en général qu'une traverse à la fois.

Le bourrage peut être effectué par simple, double ou triple plongée. La double plongée est nécessaire si le relevage dépasse 25 mm. Elle permet la descente des éléments sous la traverse, mais n'améliore pas le compactage. Dans les appareils de voie, cette méthode est recommandée si la bourreuse (alors dénommée bourreuse pour appareil de voie) ne possède que 8 bourroirs (4 de chaque côté).

Les bourroirs agissent par vibration et serrage des éléments de ballast, avec les caractéristiques suivantes :

- fréquence de vibration = 35 à 45 Hz ;
- force de serrage = 500 à 1 000 kg ;
- amplitude de vibration = 10 mm.

La fréquence de vibration de 42 Hz est la fréquence optimale de mise en place des éléments du ballast suivant leurs meilleures surfaces de contact. Cette vibration n'a que peu d'effet dans un ballast pollué ; or elle influe à 80 % sur la qualité du bourrage. La profondeur de pénétration des bourroirs a également une grande importance pour la qualité du compactage. En France, il est imposé que le haut du taquet de la pioche se trouve 15 mm sous le bas de la traverse. La fréquence de vibrations de l'unité de bourrage se situe entre 35 et 45 Hz pour les bourreuses mécaniques actuelles. À titre indicatif, la fréquence de sollicitation d'une bourreuse manuelle (groupe Jakson) est de 60 Hz. La force de serrage dépend fortement de la qualité du ballast et de sa réaction. Elle est de l'ordre de 16 kN par bourroir soit une contrainte de 1,42 MPa (bourroirs de dimensions 140 mm x 80 mm). Le temps de serrage des bourroirs décroît avec la fréquence (1,8s à 35 Hz et 1,3s à 45 Hz). La profondeur de plongée des bourroirs dans le ballast varie de 15 à 20 mm (distance entre la surface inférieure des blochets et le bord supérieur des bourroirs). L'amplitude des bourroirs varie entre 5 et 10 mm.

Le bourrage a pour but de donner une bonne assiette aux traverses c'est-à-dire de consolider leur position pour qu'elles n'aient aucune tendance à s'affaisser ou s'incliner de quelque côté que ce soit.

Il est logique que le bourrage de la traverse soit le plus intense au point d'application de la charge, c'est-à-dire au droit du rail et puis, qu'il aille graduellement en diminuant, jusqu'à 40 ou 50 centimètres vers l'intérieur de la voie et, à l'extérieur, jusqu'à l'extrémité de la traverse (figure A.15). La qualité d'un bourrage est évaluée si le contact entre la surface inférieure du blochet et le ballast est bon et aussi par la densité du ballast. Le ballast doit en effet être compacté sous le blochet.

Afin de garantir la géométrie de la voie dans de bonnes conditions de maintenance (par bourrage et dressage mécaniques), il est indispensable que la

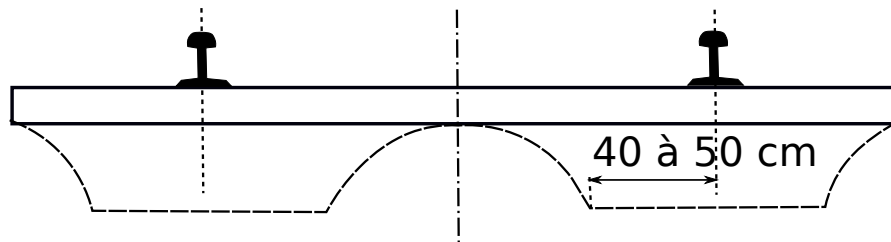


Figure A.15 – Diagramme de l'intensité du bourrage (Lamalle, 1951)

couche de ballast soit homogène. Le ballast pollué, par la perte des matériaux transportés, ou par des remontées glaiseuses ou marneuses de la plate-forme, nécessite une régénération. La pénétration des bourroirs dans le ballast peut briser les arêtes des grains et ainsi conduit à une dégradation progressive du ballast et facilite le développement des tassements. L'efficacité à long terme du bourrage décroît avec le nombre d'interventions de bourrage.

Le bourrage mécanique conduit à une fracturation du ballast. Cet effet est démontré dans des boîtes tests permettant de simuler les conditions réelles. En comparant des essais de 500 000 cycles, on observe un pourcentage de matériaux cassés deux fois plus important lorsque l'on réalise un réarrangement des grains tous les 100 000 cycles. La création de fines pollue le ballast et conduit à un moins bon drainage de l'eau de la voie. Nous remarquons une augmentation des contraintes en conditions saturées conduisant à une dégradation plus rapide des déformations géométriques de la voie. Aussi les cycles de bourrage sont moins performants en termes de trafic cumulé (figure 1.5). Le temps entre chaque bourrage est dégressif jusqu'à une limite de renouvellement du ballast.

A.6.2 Soufflage pneumatique du ballast (stoneblower)

Les chemins de fer britanniques et américains (Network Rail en collaboration avec Harsco Track Technologies) ont développé en 2009 une souffeuse pneumatique de ballast. Cette machine alternative à la bourreuse traditionnelle permet de restaurer le niveau vertical des voies avec une précision de 1 mm ainsi que l'alignement latéral. Le principe consiste à injecter de 0,5 à 22 kg de ballast sous la traverse sur un temps de 11 s maximum. Cette méthode dégrade moins le ballast que le bourrage traditionnel et génère ainsi beaucoup moins de fines. Il améliore significativement la longévité du ballast et augmente les intervalles de nettoyage du ballast.

Une comparaison des méthodes de bourrage et de soufflage a été réalisée par la compagnie de maintenance des rails d'Amérique du nord, Harsco Track Technologies en collaboration avec une filiale de ce même groupe, Zeta-Tech (Zarembski & Newmani, 2008). Les résultats de cette étude montrent que le

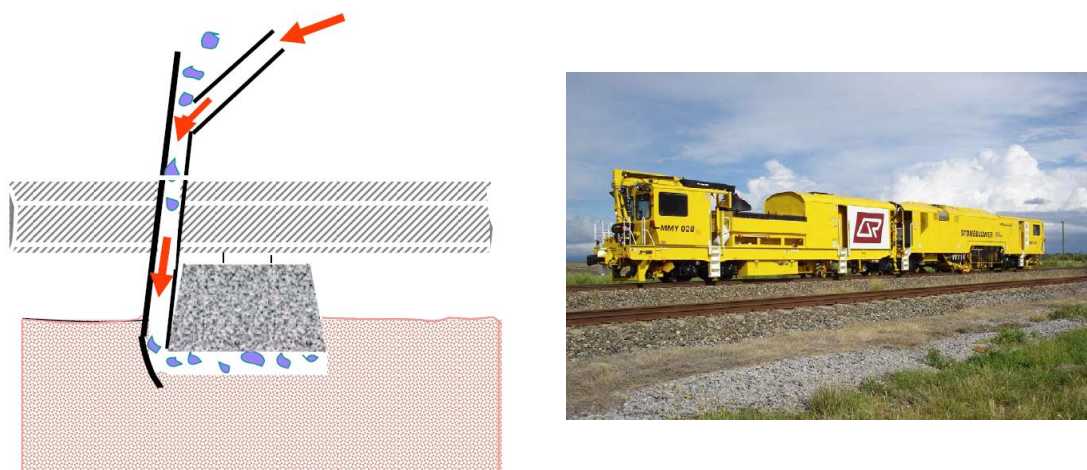


Figure A.16 – Injection pneumatique de ballast sous la traverse par le procédé "Stoneblower", [Zarembski & Newmani \(2008\)](#)

bourrage génère approximativement 4 kg de fines par bourrage tandis que le soufflage en génère un peu moins de 0,5 kg. Les fines générées par un bourrage correspondent à une durée de vie d'environ 20 millions de tonnes de trafic soit un peu moins que la traficabilité des voies sur un an.

Le niveau géométrique des voies est défini par un indice de qualité nommé TQI (Track Quality Index) qui est une fonction statistique de la géométrie de surface et aussi par la déviation de la voie (SD, Standard Deviation). Pour les lignes à grande vitesse, les conditions géométriques sont bonnes pour une valeur de TQI inférieure à 2, convenables entre 2 et 3 et insuffisantes au-delà de 3. Ce procédé présente une moins bonne productivité que le bourrage mais il génère un coût d'entretien moindre que le bourrage traditionnel.

A.6.3 Renouvellement du ballast

Le renouvellement du ballast est, souvent, exécuté en même temps que le renouvellement de l'armement. Cette opération est réalisée empiriquement après 6 cycles de bourrage, soit environ tous les 20 ans de durée de vie de la voie. Le ballast se dégrade et se pollue suite à sa propre usure ou à des remon-tées argileuses ou marneuses de la plate-forme en mauvais état, conduisant à une perte des caractéristiques mécaniques du ballast.

Le renouvellement, partiel ou total, du ballast comporte le retrait du ballast pollué par excavation, son épuration, et l'approvisionnement de ballast neuf de complément qui est exécuté par étapes :

1. dégarnissage mécanique du ballast Une dégarnisseuse assure l'enlèvement du ballast sous la voie, entraînant l'abaissement de celle-ci de 30 cm environ. Un criblage du ballast est exécuté simultanément au

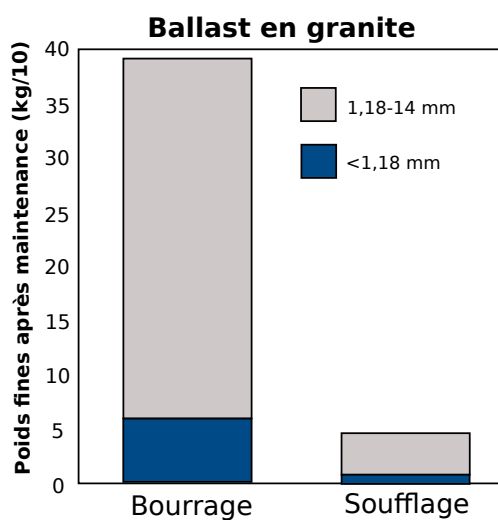


Figure A.17 – Fines produites par la maintenance des voies (bourrage et soufflage de ballast, [Zarembski & Newmani \(2008\)](#))

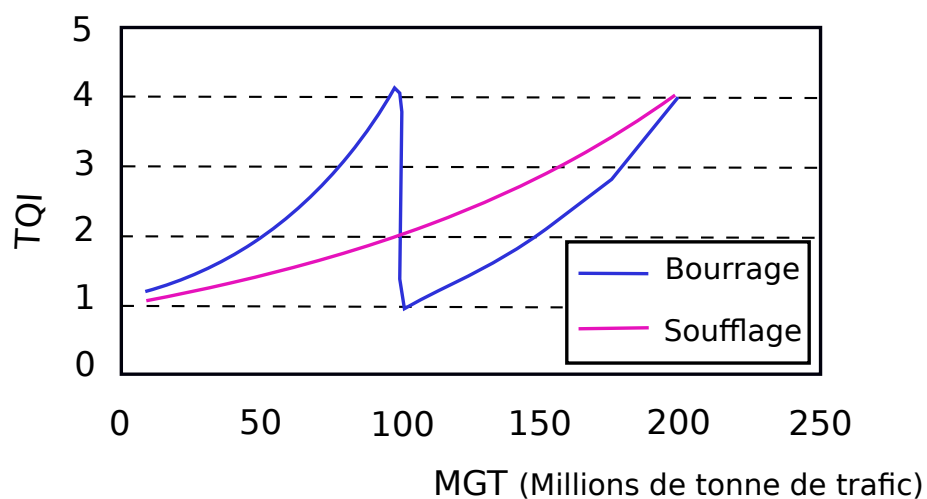


Figure A.18 – Dégradation de la voie après bourrage ou soufflage du ballast avec l'indice TQI ([Zarembski & Newmani, 2008](#))



Figure A.19 – Trains de dégarnissage mécanique (photos ETF)



Figure A.20 – Déchargement de ballast depuis des wagons de trémies (photos DROUARD ETF)

dégarnissage, les bons matériaux (entre 25 et 50 mm) sont remis dans la voie, les rejets sont déposés sur les accotements ou chargés par bandes transporteuses, dans des wagons tombereaux ou dans des wagons auto-déchargeurs ;

2. déchargement de ballast Les voies étant posées sur la plate-forme, on procède au déchargement du ballast. Le ballast est approvisionné par trains de wagons trémies : trains de 1000 tonnes de charge, chaque wagon transportant 55 tonnes de ballast. Ce ballast est déchargé par l'intermédiaire de goulottes dans l'axe et de part et d'autre de la voie.

3. Bourrage et compactage du ballast neuf

Le ballast neuf, déchargé des wagons spécialisés équipés de trémies, est mis en œuvre par passes successives de 80 mm, à l'aide d'une bourreuse mécanique (chapitre 3.2.3.2), et compacté par vibrations à l'aide d'un



Figure A.21 – Groupe de vibration d'un stabilisateur dynamique

stabilisateur dynamique. La mise au profil définitif du ballast sera réalisé par une régaleuse.

A.7 Comportement du ballast en laboratoire

A.7.1 Essai de vibration

L'étude expérimentale à échelle réduite menée par l'ENPC (laboratoire du LAMI) en collaboration avec la SNCF et le CNRS ([Foret et al., 2003](#)) permettant de reproduire les actions du bourrage (vibrations/serrage) a permis d'étudier l'influence de la fréquence de vibration au moyen de l'essai Bouba (figure A.22). Le dispositif expérimental d'échelle réduite (échelle 1/3) a permis de mettre en évidence trois types de comportement du ballast. Pour les faibles fréquences, le ballast présente un comportement de matériau dit « solide » où les grains sont sollicités par les efforts de serrage, pour les moyennes fréquences, un comportement « visqueux » où les vibrations et les forces de serrage sont équilibrées et pour les fortes fréquences, un comportement dit « liquide » où le ballast est totalement liquéfié par les vibrations :

- comportement dit « solide » jusqu'à 15 Hz (serrage),
- comportement dit « visqueux » de 15 à 30 Hz (serrage + vibration),
- comportement dit « liquide » au-delà de 30 Hz (vibration).

Cet essai consiste à exercer un serrage des grains au moyen du bourroir par mouvement horizontal oscillatoire continu sous l'action du vérin pneumatique. Le bourroir est matérialisé par une plaque en acier de 10 cm x 2,67 cm x 1 cm. Ainsi la caisse effectue un aller-retour lors d'un essai sous l'action du vérin.

En augmentant la fréquence de sollicitation, on observe que la force de serrage nécessaire pour atteindre la consigne en déplacement diminue. Ce phénomène indique que le ballast passe de l'état solide à l'état liquéfié. Les moyennes

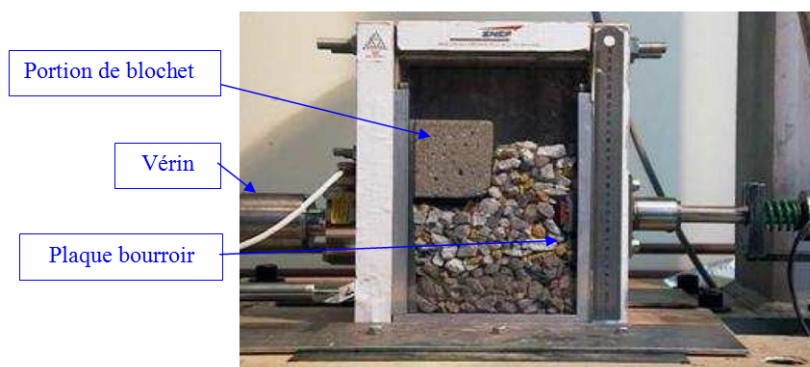


Figure A.22 – Photo de l'essai Bouba

et hautes fréquences, à la différence des faibles fréquences permettent de combler l'ensemble du vide sous le blochet, ce qui crée un bon contact entre le blochet et le ballast. Ces essais montrent l'importance de la fréquence de sollicitation des bourroirs pour obtenir un bourrage de qualité. D'autres essais de vibration ont également été réalisés afin de reproduire le comportement du ballast en voie sous un chargement donné. L'essai de Morgan et Markland en 1981 consiste à mesurer le déplacement d'une plaque circulaire en acier sous l'action de cycles de chargement. Fisher en 1983 a identifié un couple fréquence/amplitude (35 Hz ; +/- 5 mm) pour atteindre une densité optimale et une bonne stabilité du ballast au moyen d'un banc à échelle réelle. Plusieurs fréquences ont été utilisées (25, 35, 50, 80 Hz) avec différentes amplitudes (+/- 1, 3 et 5 mm).

A.7.2 Lois de tassement - Déformation permanente et élastique

Le ballast présente plusieurs phases dans son cycle de vie (figure A.23) :

- tassement directement après le bourrage de densification du ballast par le trafic (phase rapide),
- tassement plus lent fonction du temps, lié à la non élasticité du ballast (phase lente).

La prévision du tassement du ballast est un sujet qui a préoccupé un bon nombre de chercheurs dans le domaine des voies ferrées ballastées. Ces travaux ont conduit à des lois de tassement qui sont déterminées empiriquement au moyen d'essais à échelle réelle ou réduite en laboratoire. Ces lois concernent le tassement en fonction du temps et utilisent trois types d'essais (essais triaxiaux cycliques à chargement répété, essais sur modèles réduits et les essais sur modèles en vraie grandeur). Quelques exemples sont présentés ci-après.

A.7 Comportement du ballast en laboratoire

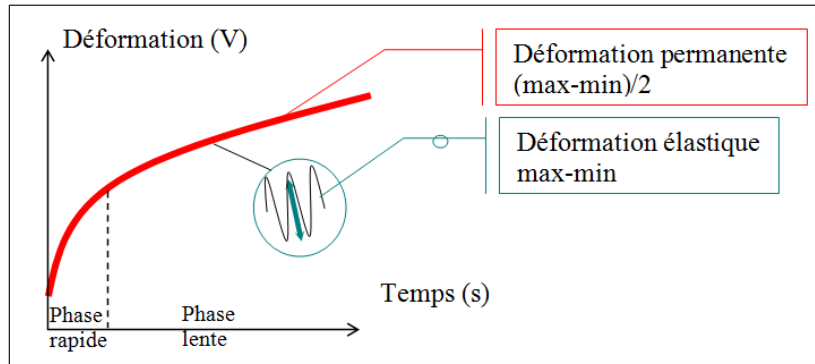


Figure A.23 – Représentation du tassement du ballast en fonction du temps

A.7.0.1 Essais triaxiaux cycliques d'après Guérin (1996); Shenton (1978); Hettler (1987)

Au moyen d'un essai triaxial, Shenton et Hettler ont déterminé une loi de tassement de la forme :

$$\delta_N = \delta_1 [1 + C_N \log N] \quad (\text{A.5})$$

avec :

- C_N : constant,
- δ_1 : tassement au premier cycle de chargement,
- δ_N : tassement pour N cycles.

Tableau A.2 – Caractéristiques des essais triaxiaux de Shenton et Hettler

Auteur	Granulométrie du ballast (mm)	Cellule triaxiale (mm)	Hauteur (mm)
Shenton	13-38	230	<460
Hettler	25-50	780	450

Profillidis (1983) a étudié la déformation permanente du ballast au moyen d'essais triaxiaux. Ces essais pour 105 cycles indiquent que la déformation est très importante pour l'application du premier cycle suite au réarrangement des grains de ballast. Après ce premier cycle, le taux de déformation permanente du ballast diminue sensiblement lorsque le nombre de cycles de chargement augmente. L'expression de la déformation permanente déduite des résultats d'essais est donnée par l'équation suivante :

$$\delta_N = \varepsilon_1(1 - 0,2 \log N) \quad (\text{A.6})$$

Ces essais, effectués par les chemins de fer britanniques dans des conditions de contraintes contrôlées, ont permis de proposer une relation entre la déformation permanente du ballast et le déviateur appliqué de la forme :

$$\delta_N = 0,082(100n - 38,2)(\sigma_1 - \sigma_2)^\alpha(1 + 0,2 \log N) \quad (\text{A.7})$$

avec

- α : coefficient fonction du niveau de contrainte appliquée
 - $1 < \alpha < 2$ pour $\sigma_1 - \sigma_2$ faible
 - $2 < \alpha < 3$ pour $\sigma_1 - \sigma_2$ élevée
- n : porosité du ballast.

A.7.0.2 Essais sur modèles réduits – Essai Microballast et Better

[Guérin \(1996\)](#) a déterminé une loi de tassement du ballast liant le tassement au déplacement élastique maximal lors d'un cycle de chargement. L'essai réalisé au CERAM a été exécuté sur microballast. Un bloc en béton de section $50 \times 500 \text{ mm}^2$ et de 100 mm de haut représente le blochet d'une traverse bi-bloc. Il est sur une couche de micro-ballast compactée de 100 mm d'épaisseur, reposant sur un élastomère représentant le sol.

L'essai consiste à appliquer plusieurs cycles de chargement sur le bloc pour simuler le trafic ferroviaire et à faire varier l'élastomère, ainsi que la vitesse de sollicitation. Le tassement du bloc ainsi que la déformation élastique est mesurée. La loi de tassement suivante a été déterminée :

$$\frac{d\delta_N}{dN} = 4,8 \cdot 10^{-7} d^{2,51} \quad (\text{A.8})$$

Ces essais montrent la dépendance de l'incrément du tassement $d\delta$ en fonction du nombre de cycles à la déflexion élastique d .

À la suite de ces essais, [Bodin \(2001\)](#) propose deux lois de tassement vertical et latéral similaires à la précédente au moyen du banc BETTER (Ballast Essai de Tassement Transversal à Échelle Réduite, figure [A.24](#)).

$$\frac{d\delta_L}{dN} = 8,1 \cdot 10^{-6} d_L^{1,15} \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{d\delta_V}{dN} = 2,5 \cdot 10^{-6} d_V^{1,17} \quad (\text{A.10})$$

Ce banc d'échelle réduite 1/3 comprend une traverse bi-blocs noyée dans le ballast et sollicitée par un vérin. La traverse repose sur du ballast, qui lui-même est installé sur un élastomère ou du bois pour représenter le sol sous-jacent.



Figure A.24 – Photographie de l'essai BETTER

A.7.0.3 Essais sur modèles expérimentaux - Loi de Sato et travaux de l'université technique de Munich (TUM)

Sato a déterminé une loi de tassement expérimentale à l'issue de mesures recueillies au moyen d'un véhicule. La vibration du rail permet d'estimer le tassement du ballast et l'évolution des irrégularités de la voie.

$$S = 2,09 \cdot 10^{-3} T^{0,31} V^{0,98} M^{1,1} L^{0,21} P^{0,26} \quad (\text{A.11})$$

avec :

- S : évolution moyenne de l'irrégularité (mm/jours),
- T : charge (millions de tonnes/an),
- V : vitesse moyenne de roulement (km/h),
- L : facteur d'influence du rail ($L=1$ pour Longs rails soudés et $L=10$ pour rails assemblés par joints),
- P : facteur d'influence du sol ($P=1$ pour sol de bonne qualité et $P=10$ cas mauvais sol),
- M : facteur de structure

$$M = P_b y_Z S_i \quad (\text{A.12})$$

avec

- P_b : pression quasi statique du ballast (Pa),
- y_Z : accélération du rail (m/s^{-2}),
- S_i : coefficient fonction des propriétés du rail.

Des essais au laboratoire de l'université de Munich ont permis de mettre en évidence trois équations de tassement (Eisenmann et Kaess, 1980). Le banc utilisé reproduit l'intégralité de la voie avec 6 traverses. L'objectif de l'essai est de déterminer l'influence de la charge de l'essieu sur le tassement du ballast et du sol sous-jacent.

A.7.0.4 Vibrogir

Le Vibrogir est un équipement qui simule le trafic ferroviaire avec des vibrateurs destinés à reproduire dans un laps de temps court l'équivalent d'un grand nombre de cycles (voir figure A.25 ci-après). Des vibrateurs actionnent en déplacement vertical une poutre ou une semelle (étude sur modèles réduits menée par SATO, Guérin (1996)), qui vient ainsi densifier le ballast. Une comparaison a été faite entre le bourrage traditionnel à la Jackson et le bourrage du Vibrogir. Les résultats de cette étude concluent sur le fait que le ballast est mieux compacté sous les traverses par l'impact de l'appareil de type Vibrogir. Ainsi, le modèle de percussion créée par le Vibrogir est plus approprié à la mise en place du ballast.



Figure A.25 – Vibrogir, http://www.rtse-workshops.org/IMG/pdf/56._ruffenach_-_ballast_characterisation_at_sncf_-_ballast_ageing.pdf

Certains protocoles de la SNCF pour la réception de composants de la voie se réfèrent à cet outil (charge de 0 à 50 kN par rail, vibration 50 Hz, arrêts $\frac{1}{4}$ du temps, temps cumulé 200 h soit 36.10^6 cycles,...).

Compléments sur l'expérimentation

B.1 Description des structures expérimentales mises en œuvre

B.1.1 Planches 1 et 2

Structures Les structures expérimentales étudiées, de 17 m de long et de 6,6 m de large sont présentées sur la figure B.1. Ces structures représentent une voie ferroviaire à l'échelle 1, sans panneau de voie, afin de n'étudier que la réponse dynamique du ballast et sa sous-couche. On se place dans l'hypothèse d'un milieu continu élastique sans déplacement des éléments de ballast. Cette planche (figures B.1.1 et B.3) comporte deux zones d'étude de 4 m par 4 m comprenant du ballast foisonné et compacté. Elle est composée depuis la base de deux couches de sable B2 surmontées de 17 cm de GNT 0/31,5, cette dernière étant respectivement recouverte d'une couche de 30 cm (planche 1) et de 3 couches de 30 cm de ballast (planche 2). Trois zones mortes permettent de compacter le matériau présent sous le ballast afin d'obtenir une qualité de compactage équivalente à une mise en œuvre de structure ferroviaire, soit un objectif q1 pour la sous-couche ferroviaire, q3 pour le sol support en sable B2, afin de ne pas avoir l'influence du sol sous-jacent sur le compactage du ballast et de la sous-couche (effet d'enclume). La mise en œuvre des matériaux est faite au moyen d'un chargeur en réglant la surface au moyen des dents du godet tout en reculant, ceci afin d'éviter de rouler sur le matériau (figure B.1).

Instrumentation Les géophones ont été déployés après la mise en œuvre de chaque couche tandis que les accéléromètres ont été insérés pendant la mise en œuvre à l'intérieur des couches.

La planche 1 avait pour objectif de caler les essais en effectuant un prétraitement des données. Ainsi nous avons pu constater que le nombre défini de 8 géophones (Tableau 3.3) n'était pas suffisant pour réaliser un traitement correct des données (dispositif d'une longueur de 1,1 m) et qu'il était préférable d'avoir 24 géophones espacés de 15 cm (dispositif d'une longueur de 3,45 m) comme les règles de l'art le préconisent. La distance de la source au premier géophone est définie à 25, 35, 45, 55 et 110 cm. La sollicitation est générée

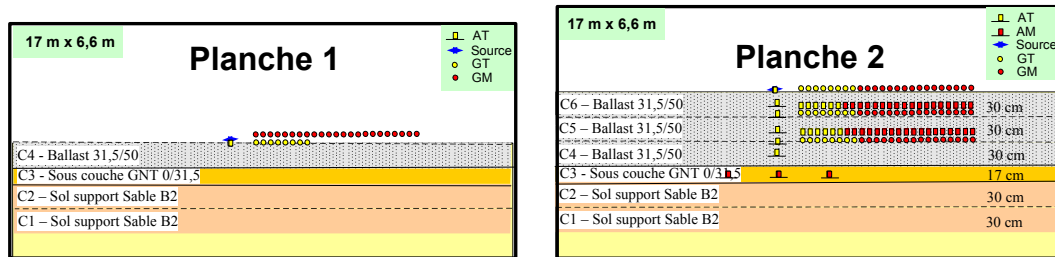
B Compléments sur l'expérimentation



(a) Vue en long

(b) Vue de profil

Figure B.1 – Mise en œuvre des matériaux au chargeur



(a) Vue en élévation de la planche 1

(b) Vue en élévation de la planche 2

Figure B.2 – Structures des planches 1 et 2 pour l'étude du ballast



(a) Vue de dessus

(b) Vue en élévation

Figure B.3 – Photographies de la planche 2 avec une épaisseur de 60 cm de ballast

B.1 Description des structures expérimentales mises en œuvre

par une source de faible énergie avec des fréquences élevées afin d'ausculter une épaisseur faible de matériaux (30 à 90 cm de ballast).

B.1.2 Planche 3

Suite au traitement des essais de la planche 1, nous avons complété la flûte sismique de 8 géophones triaxiaux au moyen de 16 géophones monoaxiaux. Les résultats de la planche 2 montrent que l'utilisation de deux types de capteur qui n'ont pas la même bande passante perturbe le résultat des courbes de dispersion. Dans ce contexte, une troisième planche a été réalisée avec une flûte sismique de 23 géophones monoaxiaux plus un géophone à la source, ceci sur deux plots d'étude de 4 m par 4 m comprenant du ballast foisonné et compacté. Une ligne de 5 géophones triaxiaux a été instrumentée en parallèle de la flûte sismique afin d'étudier le rapport spectral H/V. Tous les géophones ont été installés sur une structure ferroviaire existante constituée d'une épaisseur de 80 cm de ballast (figure B.4 et B.5). Cette dernière comprend depuis sa base deux couches de sable de 40 cm, une couche de 35 cm de GNT 0/60 recouverte de 20 cm de GNT 0/31,5 (originaires de la carrière de Luché) surmontée de 80 cm de ballast mis en œuvre en trois couches.

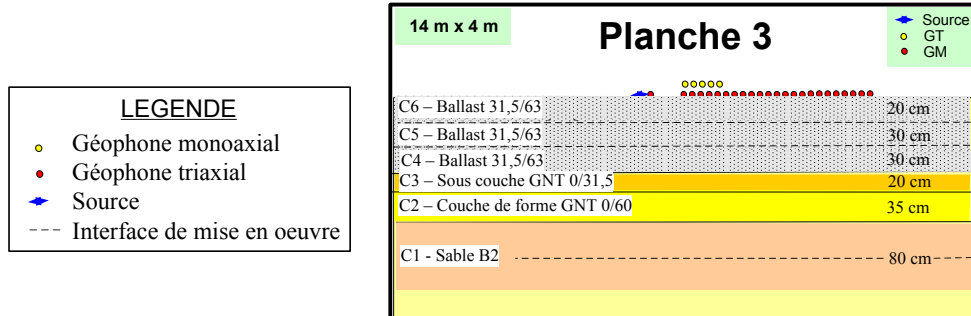


Figure B.4 – Structure expérimentale de la planche 3

Des essais de propagation ont été effectués sur la sous-couche ferroviaire de la planche 3 afin de caractériser la propagation des ondes de compression dans cette couche, ceci afin de mieux comprendre les résultats de sismique obtenus sur le ballast.

B.1.3 Planche 4

En complément des essais des planches 1 et 2, une planche expérimentale de même dimension que le ballast (4 m par 4 m – épaisseur 30 cm) a été mise en œuvre avec du sable (figures B.6 et B.7) afin de pouvoir comparer la propagation dans le ballast avec celle dans le sable assimilable à un milieu continu

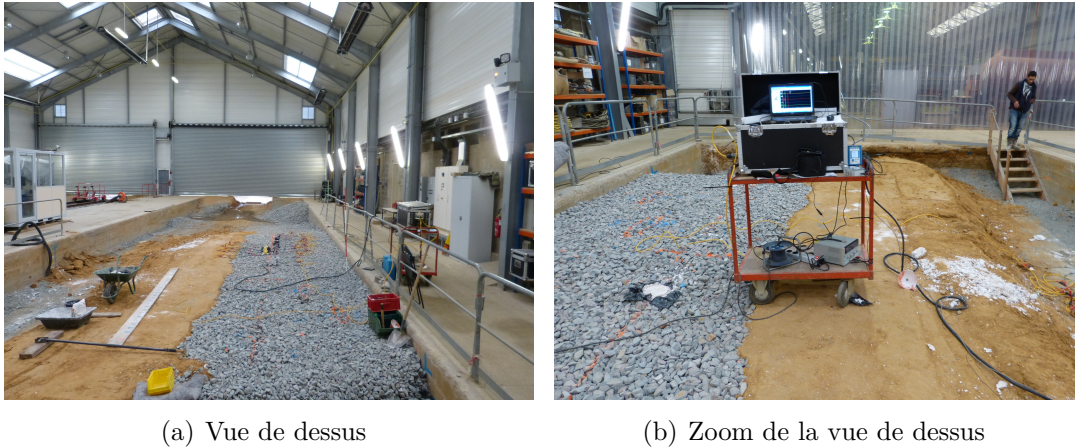


Figure B.5 – Photographies de la planche 3 avec une épaisseur de 80 cm de ballast

d'un plot compacté. Cette planche comporte ainsi une flûte sismique similaire à la planche 2 avec 8 géophones triaxiaux et 16 géophones monoaxiaux. Aucun essai n'a été réalisé avec une flûte sismique de 24 géophones monoaxiaux car les résultats des courbes de dispersion sont satisfaisants avec les 16 géophones monoaxiaux. Le milieu est moins amortissant que le ballast et permet ainsi d'obtenir de bonnes courbes de dispersion pour un offset à la source de 130 cm.

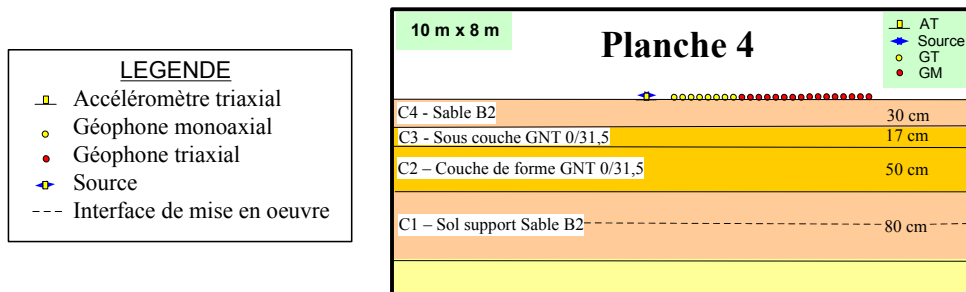
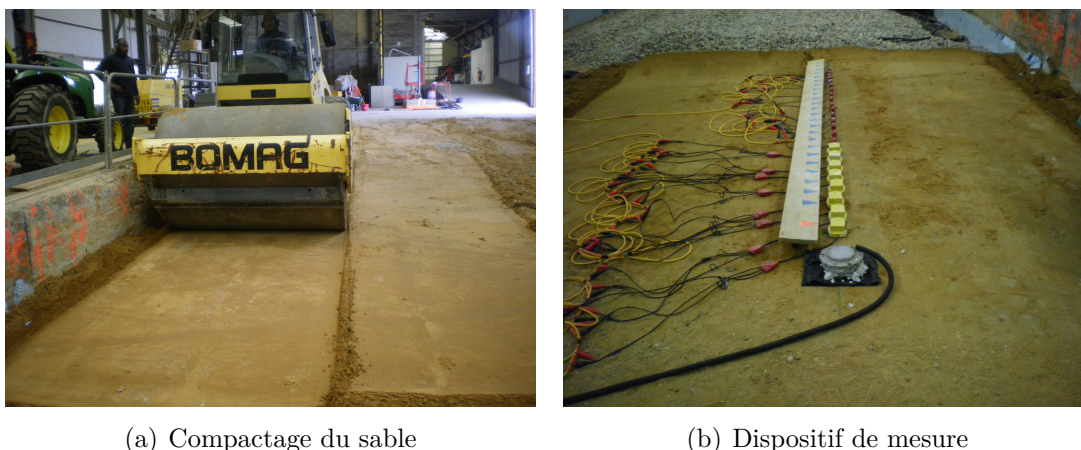


Figure B.6 – Structure expérimentale de la planche 4

B.1.4 Caractéristiques des matériaux

Les matériaux mis en œuvre dans les voies ferrées présentent de très bonnes caractéristiques mécaniques. Ils doivent être conformes à la norme XP P 15-545 ([Snecf, 1985](#)) ou répondre à des spécifications techniques de la SNCF (exemple pour la fourniture des granulats ([Snecf, 1999](#))) ou à des référentiels définis en préalable à chaque nouveau chantier. Seules certaines carrières spécifiques répondent à ces exigences.

B.1 Description des structures expérimentales mises en œuvre



(a) Compactage du sable

(b) Dispositif de mesure

Figure B.7 – Photographies de la planche expérimentale 4

Suivant la qualité du sol support et la classe de portance de la plate-forme, les différentes couches d'assises de la plate-forme ferroviaire (couche de forme et sous-couche) sont caractérisées par une épaisseur et une qualité des matériaux. Ces deux paramètres combinés permettent ainsi à la voie ferrée d'atteindre un bon comportement.

Les caractéristiques des matériaux des différentes couches mises en œuvre sont définies suivant les normes XP P 15-545, NF P 11-300, qui permettent de définir la classe des matériaux (voir tableaux B.1, B.2 et B.3 ci-après).

Tableau B.1 – Matériaux des planches 1 et 2

PLANCHE 1 et 2								
Matériaux	d_{min}/D_{max}	Origine	LA	MDE	VBs	Norme	$\rho d^{(*)}$ (t/m ³)	$W^{(*)}$ (%)
Ballast C4	31,5/50	Vignats	14	3	-	XPP15-545 NFP13-450	-	-
GNT	0/31,5	Vignats	20	3,4	0,09	NFP11-300 ST590B	2,23	6,7
Sable B2	0/10	Snec	-	-	0,6	NFP11-300	1,81	12,3
(*) : OPN/OPM								

B.1.4.1 Ballast

Suite à la réalisation complémentaire de la planche 3, nous avons utilisé deux types de ballast et de grave non traitée pour la sous-couche :

- ballast 31,5/50 et GNT 0/31,5 provenant des carrières de Vignats pour les planches 1 et 2,
- ballast 31,5/63 et GNT 0/31,5 provenant des carrières de Luché pour la planche 3.

B Compléments sur l'expérimentation

Tableau B.2 – Matériaux de la planche 3

PLANCHE 3								
Matériaux	d_{min}/D_{max}	Origine	LA	MDE	VBs	Norme	$\rho d^{(*)}$ (t/m ³)	$W^{(*)}$ (%)
Ballast C2	31,5/63	Luché	9	5		XPP15-545 NFP13-450	-	-
GNT	0/31,5	Luché	-	-	-	NFP11-300 ST590B	-	-
GNT C1B4	0/60	Luché		-		NFP11-300 ST590B	2,33	6,5
(*) : OPN/OPM								

Tableau B.3 – Matériaux de la planche 4

PLANCHE 4								
Matériaux	d_{min}/D_{max}	Origine	LA	MDE	VBs	Norme	$\rho d^{(*)}$ (t/m ³)	$W^{(*)}$ (%)
Sable B2	0/10	Snec	-	-	0,6	NFP11-300	1,81	12,3
GNT	0/31,5	Vignats	20	3,4	0,013		2,16	7,3
GNT	0/31,5	Stref	-	-	-	-	2,1	8,4
Sable B2	0/10	Snec	-	-	0,6	NFP11-300	1,88	10,1
(*) : OPN/OPM								

Dans les deux cas, le compactage de ce matériau est effectué au moyen d'un compacteur vibrant afin d'arranger les éléments de ballast et atteindre une densité similaire à celle obtenue par l'exploitant sur les chantiers ferroviaires à partir d'une stabilisatrice et d'une bourreuse.

Ballast 31,5/50 - Vignats Ce matériau est entièrement concassé et lavé et présente une granulométrie 31,5/50 de catégorie C2. Ce matériau est conforme aux spécifications de la SNCF pour les LGV selon la norme XP P 15/545. Il est mis en œuvre au chargeur et réglé manuellement en altimétrie.

Ballast 31,5/63 - Luché La planche 3 avec 80 cm de ballast provient de la carrière de Luché. Il est entièrement concassé et lavé et présente une granulométrie 31,5/63 de catégorie C2. Ce matériau est conforme aux spécifications de la SNCF pour les LGV selon la norme XP P 15/545. Ce matériau comporte 0,07 % de fines (<63 μ m), 0,11 % de grains fins (0,5 mm) et les granulats présentent les caractéristiques mécaniques suivantes : Los Angeles (LA) de 9 et

B.1 Description des structures expérimentales mises en œuvre

Micro Deval (MDE) de 5.

B.1.4.2 Sous-couche

GNT 0/31,5 - Vignats Sous le ballast, une épaisseur de 17 cm de grave 0/31,5 mm est mise en place. Le compactage est réalisé avec 12 passes de compacteur tandem classé VT2 afin d'obtenir un objectif de compactage q1. Cette grave entièrement concassée provient de la carrière de Vignats et correspond également aux spécifications de la SNCF. Les caractéristiques Optimum Proctor Modifié (OPM) sont les suivantes :

- $\rho_{dOPM} = 2,23 \text{ t/m}^3$,
- $w_{OPM} = 6,7 \%$

Ce matériau comporte 5,6 % de fines ($< 80 \mu\text{m}$) et les granulats (quartzite) présentent comme caractéristiques $LA = 20$ et $MDE = 3,4$. La VBS est de 0,09.

GNT 0/31,5 - Luché La planche 3 avec 80 cm de ballast comporte une sous-couche ferroviaire de 20 cm d'épaisseur en matériau GNT 0/31,5 mm. La grave entièrement concassée provient de la carrière de Luché et correspond aux spécifications de la SNCF.

B.1.4.3 Couche de forme

Sable B2 Deux couches de 30 cm de sable B2 sont mises en œuvre à la base de la sous-couche ferroviaire afin d'obtenir un sol support de bonne qualité et homogène. Le matériau doit atteindre un objectif de compactage q3.

- $\rho_{dm} = 98,5 \%$ ρ_{dOPN} ,
- $\rho_{dfc} = 96 \%$ ρ_{dOPN} .

Les caractéristiques Optimum Proctor Normal (OPN) de ce matériau sont les suivantes :

- $\rho_{dOPN} = 1,81 \text{ t/m}^3$,
- $w_{OPN} = 12,3 \%$.

La courbe OPN de ce matériau étant très plate, nous avons privilégié de fixer une teneur en eau de mise en œuvre de 6,5 %. La valeur au bleu (V_{BS}) de ce matériau est de 0,6.

Grave 0/60 La couche de forme de la planche 3 avec 80 cm de ballast présente une épaisseur de 35 cm en matériau grave 0/60 mm classé C1B4 suivant NF P 11-300. La grave concassée provient de la carrière de Luché et correspond aux spécifications de la SNCF. Une identification géotechnique du sol a été réalisée. Les caractéristiques Optimum Proctor Modifié (OPM) de ce matériau sont les suivantes :

- $\rho_{dOPM} = 2,33 \text{ t/m}^3$,
- $w_{OPM} = 6,5 \%$.

Les critères de compactage des planches figurent en annexe [B.1.4.3](#).

B.1.5 Compactage des planches

Les critères de compactage de ces matériaux sont connus dans le domaine routier et sont transposables au domaine ferroviaire. La définition des objectifs de compactage retenus pour l'expérimentation a été validée par la direction de l'ingénierie de la SNCF. Ces objectifs définissent des valeurs seuils de masse volumique sèche moyenne sur la hauteur de la couche (ρ_{dm}) et des valeurs en fond de couche (ρ_{dfc}).

Les exigences de densité sont définies de la façon suivante :

- Objectif de compactage de qualité q1 pour les sous-couches et couches de forme ferroviaires des différentes planches :
 - $\rho_{dm} = 100 \%$ ρ_{dOPM} ,
 - $\rho_{dfc} = 98 \%$ ρ_{dOPM} .
- Objectif de compactage de qualité q3 pour les couches de sol support :
 - $\rho_{dm} = 98,5 \%$ ρ_{dOPN} ,
 - $\rho_{dfc} = 96 \%$ ρ_{dOPN} .
- Objectif de compactage de qualité q4 ([Corté et al., 2000](#)) pour le sable en substitution du ballast de la planche 4 :
 - $\rho_{dm} = 95 \%$ ρ_{dOPN} ,
 - $\rho_{dfc} = 92 \%$ ρ_{dOPN} .

L'objectif de compactage recherché pour cette couche est q4 si l'on veut être de l'ordre de la densité du ballast et q1 si l'on veut se rapprocher de la portance du ballast. Dans notre cas, il est préférable d'avoir une représentation en densité, d'où l'objectif de compactage q4 pour la couche de sable.

Le compactage est assuré selon la norme NF P 98-736 ([Afnor, 1992](#)) au moyen d'un compacteur tandem VT2, d'un compacteur monobille VM3 et d'un compacteur monobille VM4.

Le coefficient de foisonnement du sable et de la grave étant d'environ 20 %, il convient de mettre en œuvre 36 cm de sable foisonné pour atteindre 30 cm compacté et 24 cm de GNT 0/31,5 pour 17 cm.

B.1.5.1 Exigences de compactage selon le GTR - Objectifs q3 et q4

Suivant la nature et l'état du matériau ainsi que selon l'objectif de densité (q3 ou q4), un nombre de passes est prescrit pour une épaisseur donnée de

B.1 Description des structures expérimentales mises en œuvre

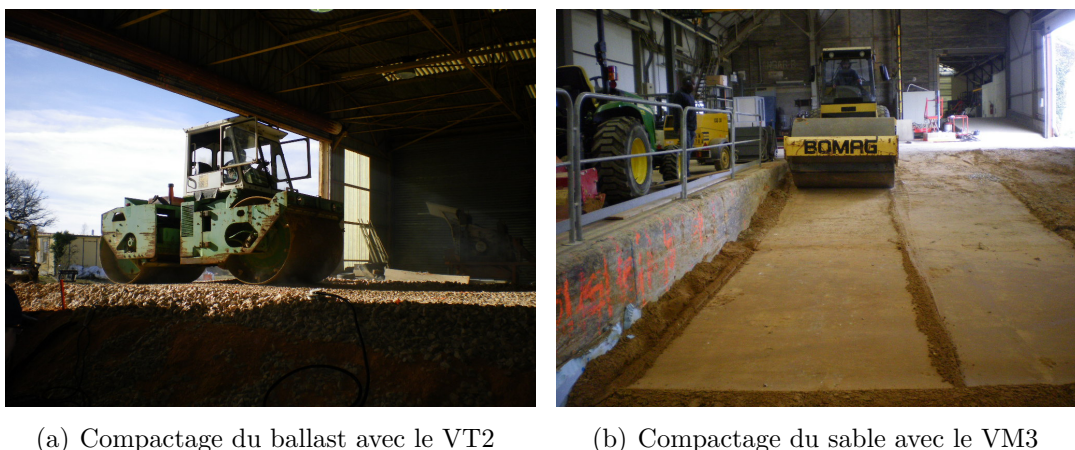


Figure B.8 – Moyens de compactage des matériaux de la structure des planches 1 et 4

matériau selon le Guide des Terrassements Routiers ou GTR ([Corté et al., 2000](#)).

La dernière couche de ballast de la planche 2 devait comprendre 4 passes de compacteur monobille classé VM3. Néanmoins, nous n'avons pu en réaliser que deux suite au départ latéral des éléments de ballast à cause de la faible largeur de compactage.

Une différence de hauteur de plusieurs centimètres a été mesurée entre les deux plots (compacté et non compacté). Le nivellement donne une différence de 4 à 10 cm suivant le point pour la couche de 30 cm (figure B.9). Ce constat est vrai pour 60 cm de ballast mais l'est moins à 90 cm suite à des difficultés de compacter la dernière couche.

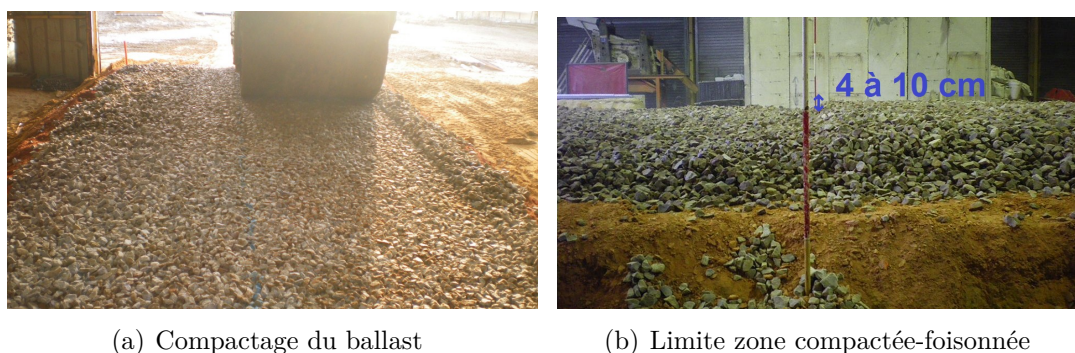


Figure B.9 – Photographie du compactage de la planche 2 avec 30 cm de ballast

B.1.5.2 Calcul du nombre de passes pour un objectif q_1

Le nombre de passes pour la sous couche a été déterminé de la façon suivante : à partir des caractéristiques connues du compacteur utilisé (CATM

du VA12 - classe VT2) on obtient le débit théorique de la machine. Ainsi il est possible de calculer le nombre de passes n_c à réaliser dans le cas d'un objectif de compactage q1.

$$Q_{theorique} = \frac{L_c V_c e_c}{n_c} \quad (B.1)$$

$$n = \frac{V e}{\frac{Q}{L}} \quad (B.2)$$

avec :

- $Q_{theorique}$: débit théorique du compacteur en t/h,
- L_c : largeur de la bille du compacteur en m,
- V_c : Vitesse du compacteur en km/h,
- e_c : épaisseur de matériaux à compacter en m,

Dans notre cas, le compacteur utilisé d'une largeur de 1,7 m présente un débit de 50 t/h pour une grave entièrement concassée classée dans la classe de compactage "DC3" avec une épaisseur de 20 cm et une vitesse de 2,5 km/h. Le nombre de passes à réaliser est de 10 passes dans le cas général. En regardant le matériel qui s'en rapproche le plus, soit le compacteur VA15 (CATM N° 75), le débit est de 160 t/h. D'où un nombre de passes d'au moins 12 passes. Le récapitulatif des conditions de mise en œuvre des planches 1, 2, 3 et 4 figure dans les tableaux B.4, B.5 et B.6.

B.1.6 Mesures à la mise en œuvre - planches 1 et 2

Un contrôle des exigences d'épaisseur de couche et de densité doit être fait afin de vérifier que les objectifs de résultats sont bien atteints à partir des objectifs de moyens décrits en annexe B.1.4.3.

Ainsi, au cours de la mise en œuvre des différentes couches, les paramètres suivants ont été contrôlés (figure B.10) :

- épaisseur (couches 1 à 6) : niveau optique Wild N2 (précision $\pm 0,1$ mm),
- masse volumique (couches 1 à 3) : gamma densimètre à pointe GPV10/22 et GPV 25/40 cm (précision ± 1 %), GDS200,
- teneur en eau (couches 1 à 3) : prélèvements destructifs et étuvage pendant 24 heures à 105°C,
- Portance (couches 1 à 3) : essai de plaque pour déterminer E_{V1} et E_{V2} .

B.1.6.1 Mesures de nivellement

Le nivellement de la structure (figure B.11) est réalisé sur 7 interfaces (sol support, 2 couches de sable B2, GNT et 3 couches de ballast) afin de connaître

B.1 Description des structures expérimentales mises en œuvre

Tableau B.4 – Récapitulatif du compactage des couches des planches 1 et 2

Couche - Matériau	Compacteur	Épaisseur foisonnée (cm)	Épaisseur compactée obj. (cm)	État	Nb passes	Vitesse (km/h)
C0 - Surface sol	VT2	-	-	ts	2	2
C0 - Surface sol	VT2	-	-	ts	2	2
C1 - Sable B2	VT2	36	30	s	4PV VT2	2
C1 - Sable B2	VT2	36	30	s	4PV	2
C2 - Sable B2	VT2	36	30	s	4PV	2
C3 - GNT 0/31,5	VT2	24	17	h	12PV VT2	2,5
C4 - Ballast	VT2	35	2x15cm sur zone compactée	ts	1PL + 4PV	2,5
C5 - Ballast	VT2	35	2x15cm sur zone compactée	ts	1PL + 4PV	2,5
C6 - Ballast	VM3	35	2x15cm sur zone compactée	ts	1PL + 2PV	2,5
ts=très sec, s=sec, h=humide, P=Passes, V=Vibrantes, L=Lisses						

Tableau B.5 – Récapitulatif du compactage des couches de la planche 3

Matériau	Compacteur	Épaisseur compactée obj. (cm)	TE (%)
C1 - Sable B2	VM4	2x40	8,3±0,3
C2 - GNT 0/60	VM4	2x17,5	6,1±0,2 1,9±0,2
C3 - GNT 0/31,5	VM4	20	4±0,3
C4 - Ballast 31,5/63	VT2	80 en 5 couches	-

B Compléments sur l'expérimentation

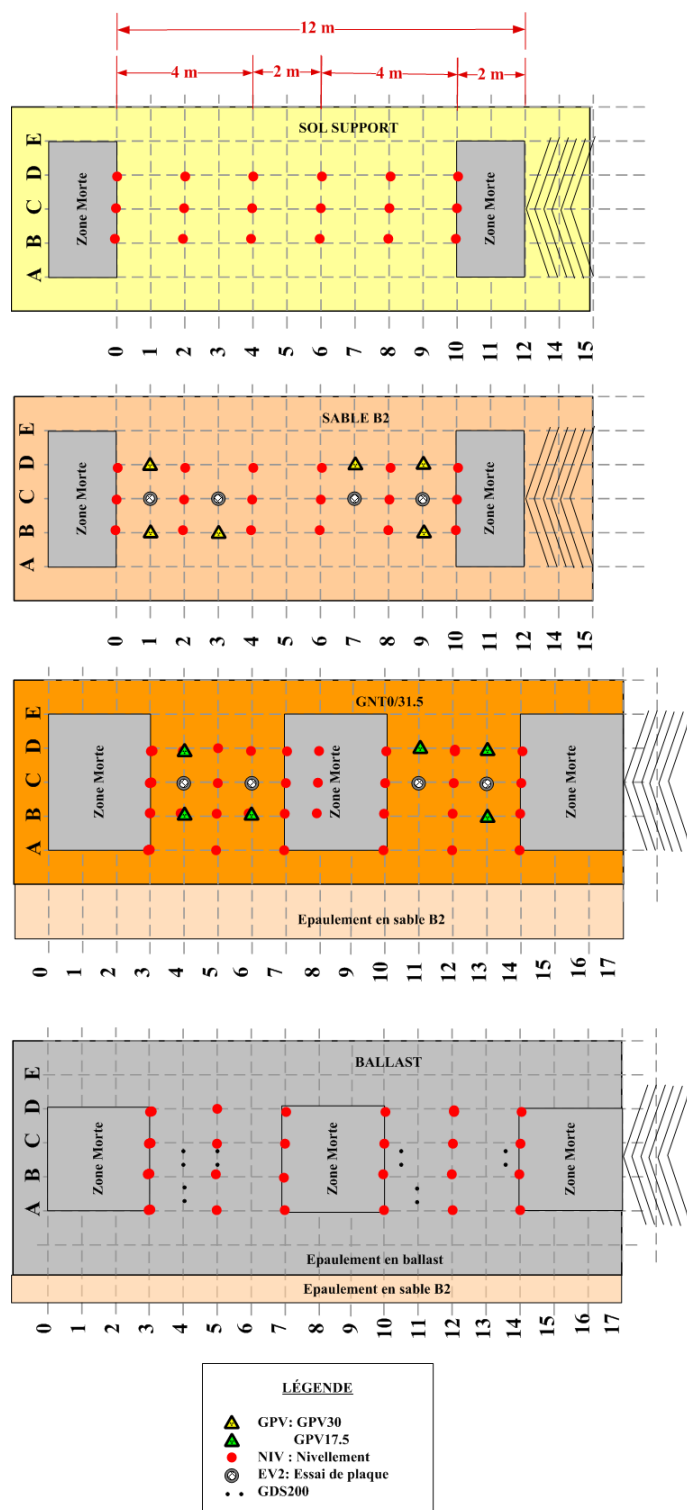


Figure B.10 – Schéma des couches avec visualisation des contrôles d'épaisseurs de densité et de portance réalisés à la mise en œuvre

B.1 Description des structures expérimentales mises en œuvre

Tableau B.6 – Récapitulatif du compactage des couches de la planche 4

Matériau	Compacteur	Épaisseur compactée obj. (cm)	Nb passes
C1 - Sable B2	VT2+VM4	2x40	6PV
C2 - GNT 0/31,5	VM4	50	5PV
C3 - GNT 0/31,5	VM4	20	16PV
C4 - Sable B2	VM3	30	4PV
P=Passes, V=Vibrantes			

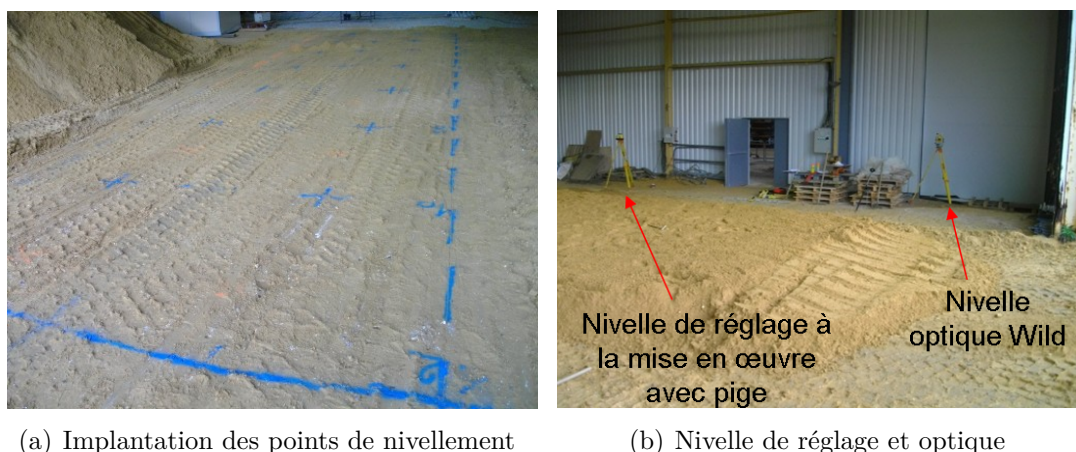


Figure B.11 – Photographie des mesures de nivellement

B Compléments sur l'expérimentation

précisément l'épaisseur mise en œuvre pour chaque couche. Les points de nivellement sont définis sur la figure B.10 (point rouge sur le quadrillage).

Pendant la mise en œuvre, l'épaisseur foisonnée est vérifiée au moyen d'une pige et d'une nivelle de réglage.

Tableau B.7 – Épaisseurs des couches mises en œuvre contrôlées par nivellement

Matériau	Couches	Épaisseur objectif (cm)	Zone foisonnée		Zone compactée	
			Épaisseur (cm)	Écart-type (cm)	Épaisseur (cm)	Écart-type (cm)
Sable B2	C1	30	29	1	31	2
Sable B2	C2	30	31	1	32	2
GNT 0/31,5	C3	17	23	1	17	3
Ballast 30 cm	C4	30	33	2	29	2
Ballast 30 cm	C5	30	33	4	40	3
Ballast 30 cm	C6	30	29	2	33	1
Épaisseur totale		167	178		182	

Si l'on compare les épaisseurs des deux plots (compacté et foisonné), on constate que la zone foisonnée présente une sous-couche en GNT plus importante de 6 cm, une première couche de ballast avec 4 cm de plus, une deuxième couche de ballast avec 7 cm en moins et une troisième avec 4 cm en moins (en rouge dans le tableau B.7). La structure atteint ainsi une hauteur finale de 1,78 m côté foisonné et de 1,82 m du côté compacté.

B.1.6.2 Contrôle de la masse volumique

Sable B2 et GNT : Pendant la mise en œuvre des couches sous le ballast, des mesures de masse volumique humide ont été réalisées au moyen de gamma densimètre à profondeur variable (GPV - figure B.12). Les gammadensimètres utilisés sont les GPV17,5 sur la GNT0/31,5 et GPV30 pour les couches de sable. À chaque point de GPV est associé une mesure de teneur en eau par prélèvement à la tarière, afin d'obtenir une masse volumique sèche.

B.1 Description des structures expérimentales mises en œuvre

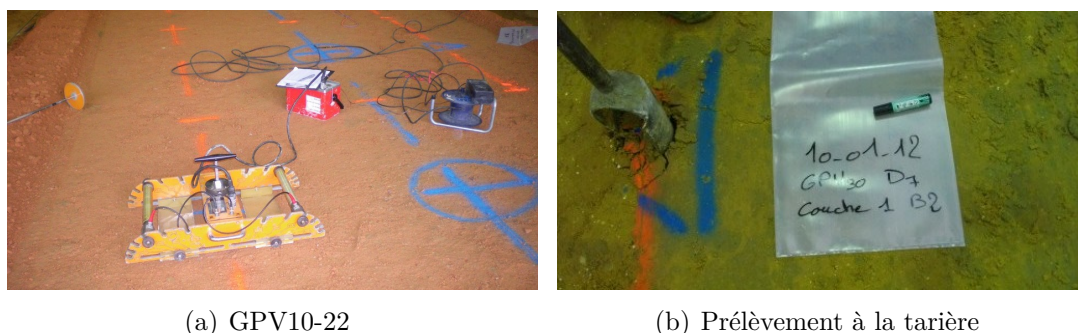


Figure B.12 – Contrôle de la masse volumique sèche

Aucune mesure au GPV n'a été réalisée sur le ballast pour des questions de radioprotection car ce matériau est très poreux et laisse passer les rayonnements gamma.

Les teneurs en eau mesurées à chaque point GPV sont de 5,3 % pour la première couche de sable B2 et de 8,2 % pour la seconde. La teneur en eau OPN des essais Proctor est de 12,3 %, ce qui est élevé pour ce type de matériau. Aussi, nous souhaitions atteindre 6,5 % (courbe Proctor plate). Les résultats de taux de compactage (tableau B.8) indiquent que la teneur en eau était bien adaptée avec des résultats supérieurs à 100 % dans les deux cas. Aucun matelassage, ni aucun feuilletage n'a été visualisé en cours de la mise en œuvre.

Tableau B.8 – Moyenne des 6 mesures GPV réalisées sur les couches de sable et de GNT 0/31,5 des planches 1 et 2

Matériau	Couches	Objectif de compactage	Teneur en eau (%)	Masse volumique humide (t/m^3)	Masse volumique sèche (t/m^3)	Taux de compactage (%)
Sable B2	C1	q3	5,31±0,38	1,93±0,04	1,83±0,03	101,15±1,76
Sable B2	C2	q3	8,17±0,41	2,06±0,03	1,90±0,03	105,17±1,55
GNT 0/31.5	C3	q1	4,86±0,22	2,06±0,03	1,90±0,03	101,15±1,19

Les exigences de densité visées pour la planche sont celles pour une mise en œuvre en couche de forme pour le sable B2 « q3 » (densité moyenne $\geq 98,5\%$ d_{OPN} et densité en fond de couche $\geq 96\%$ ρd_{OPN}) et q1 pour la GNT 0/31,5 (densité moyenne $\geq 100\%$ ρd_{OPM} et densité en fond de couche $\geq 98\%$ ρd_{OPM}). Ces objectifs sont atteints pour les trois premières couches (tableau B.8).

Ballast Des essais préliminaires de densité poids/volume ont été réalisés sur le ballast ; néanmoins les résultats obtenus n'ont pas été satisfaisants de par la configuration géométrique du ballast.

Des mesures de densité ont été opérées au moyen d'un matériel automatique ne nécessitant pas la présence de l'utilisateur pendant les essais. Ainsi, des mesures à la Double Sonde Gamma (GDS200) sont réalisées conformément à la norme NF P 94-062 (Afnor, 1997). L'essai consiste à mesurer la distribution de la densité en place en fonction de la profondeur. La profondeur d'auscultation est de 90 cm avec un pas de mesure de 25 mm à partir de la couche de ballast (figure B.13). Les moyennes obtenues sont le résultat de 2 mesures par zone (foisonnée et compactée).



Figure B.13 – Photographies de la double sonde gamma - planche 2 - 90 cm de ballast

Tableau B.9 – Moyenne des 2 essais de double sonde réalisés sur le ballast

Matériau	Couches	Zone foisonnée		Zone compactée	
		Teneur en eau (%)	Masse volumique sèche (t/m ³)	Teneur en eau (%)	Masse volumique sèche (t/m ³)
Ballast	C6	0,14	1,55±0,06	0,14	1,57±0,06
Ballast	C5	0,14	1,53±0,05	0,14	1,71±0,04
Ballast	C4	0,14	1,56±0,04	0,14	1,81±0,06

B.1 Description des structures expérimentales mises en œuvre

La mesure de densité à la double sonde (figure B.14) indique un gradient de densité entre le haut de la couche de ballast et le bas. Ce constat est lié à un défaut de compactage de la dernière couche de ballast mais aussi à la présence de la sous-couche ferroviaire fortement compactée qui a eu un effet d'enclume vis-à-vis de la première couche de ballast.

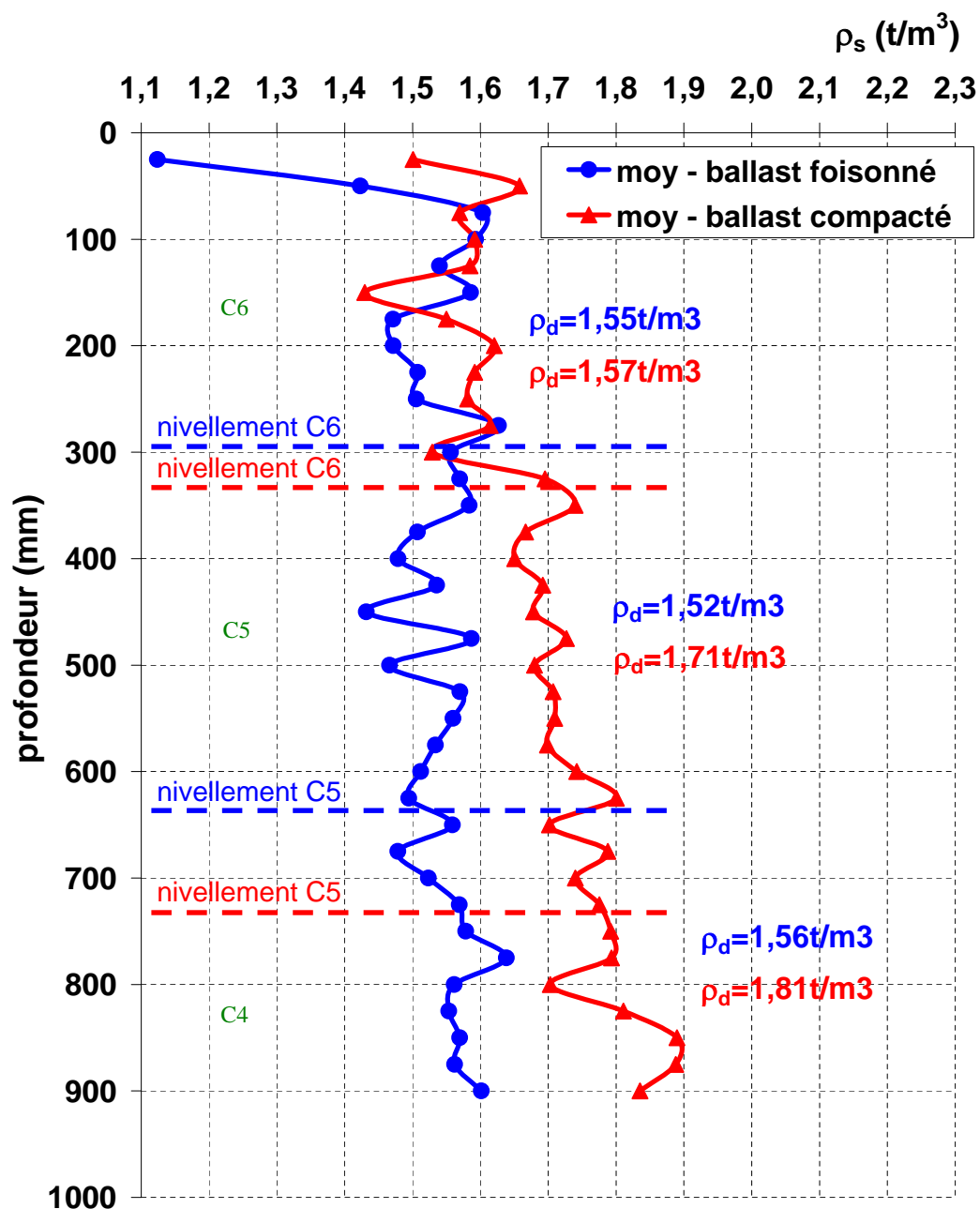


Figure B.14 – Densité du ballast obtenue avec la double sonde gamma sur la planche 2

B Compléments sur l'expérimentation

La superposition des épaisseurs réelles des couches de ballast (nivellement) avec les courbes de gradient de densité du ballast permet de calculer de façon plus correcte la densité moyenne des 3 couches de ballast (tableau B.9).

B.1.6.3 Portance des couches de sable et GNT

Des mesures de portance à l'essai de plaque (figure B.15) ont été réalisées sur les couches de sable et de GNT 0/31,5 à raison de 4 essais par couche. Ces essais sont réalisés selon la norme NF P 94-117-1 (Afnor, 2000) au moyen de capteur de déplacement type LVDT avec les étendues de mesure définies dans le tableau B.10.



Figure B.15 – Photographie d'un essai à la plaque sur la grave 0/31,5

Les résultats des essais de plaque figurent dans le tableau B.10.

Tableau B.10 – Résultats des essais de plaque

Couche	Point	E_{V1} (MPa)	E_{V2} (MPa)	K	capteur utilisé
C1 Sable B2	C1	43	99,18	0,43	0/5mm
	C3	27,27	83,98	0,32	0/5mm
	C7	35,54	92,83	0,38	0/5mm
	C9	66,77	104,66	0,64	0/5mm
	Moyenne		95±9		
C2 Sable B2	C1	19,27	67,06	0,29	0/25mm
	C3	25,79	72,55	0,36	0/5mm
	C7	50,11	87,98	0,57	0/5mm
	C9	37,81	90,49	0,42	0/5mm
	Moyenne		80±11		
C3 GNT 0/31,5	C1	34,62	78,08	0,44	0/25mm
	C3	43,79	92,17	0,48	0/25mm
	C7	39,22	82,12	0,43	0/25mm
	C9	36,71	74,29	0,49	0/25mm
	Moyenne		84±9		

Les mesures de portance comprises entre 50 et 120 MPa conduisent à classer les plateformes en PF2 (Corté et al., 2000).

B.2 Inventaire des caractéristiques des capteurs de l'expérimentation

B.2 Inventaire des caractéristiques des capteurs de l'expérimentation

Tableau B.11 – Récapitulatif des capteurs planche 2 verticale dans le plot compacté

Zone instrumentée		Appellation capteur	Voie	Caractéristiques			
				BP (Hz)	EM	Sensibilité	Unité
Source	Disque	A25V	z	1-20000	±5000g	1,00	mV/g
		A25L	x	?	±100g	96,4	mV/g
		A25T	y	20-1000	±50g	96,4	mV/g
	Bastaing	A25V	z	0,2-15000	±50g	100	mV/g
		A25L	x	0,2-15000	±50g	100	mV/g
		A25T	y	0,2-15000	±50g	100	mV/g
	V.P	A25V	z	0,2-15000	±50g	100	mV/g
		A25L	x	0,2-15000	±50g	100	mV/g
		A25T	y	0,2-15000	±50g	100	mV/g
	V.I	A25V	z	0,2-15000	±50g	100	mV/g
		A25L	x	0,2-15000	±50g	100	mV/g
		A25T	y	0,2-15000	±50g	100	mV/g
Ballast	90cm	A26V	z	10-1000	±20g	199,1	mV/g
		A26L	x	10-1000	±20g	198,5	mV/g
		A26T	y	10-1000	±20g	197,3	mV/g
	75cm	A27V	z	10-1000	±20g	197,6	mV/g
		A27L	x	10-1000	±20g	197,5	mV/g
		A27T	y	10-1000	±20g	198,0	mV/g
	60cm	A28V	z	100	±10g	200	mV/g
		A28L	x	100	±10g	200,2	mV/g
		A28T	y	100	±10g	200,35	mV/g
	45cm	A29V	z	100	±10g	200,25	mV/g
		A29L	x	100	±10g	199,9	mV/g
		A29T	y	100	±10g	200,5	mV/g
	30cm	A30V	z	10-600	±20g	198,8	mV/g
		A30L	x	10-500	±20g	197,7	mV/g
		A30T	y	10-400	±20g	197,6	mV/g
Sous-couche	17cm	AM31	z	0-250	±10g	194,531	mV/g
		AM32	z	0-250	±10g	197,258	mV/g
		AM33	z	0-250	±10g	196,63	mV/g
		AM34	z	0-250	±10g	196,421	mV/g
		AM35	z	0-250	±10g	196,189	mV/g
		AM36	z	10-350	±10g	489,6	mV/g
		AM37	z	10-300	±10g	491,1	mV/g
		AM38	z	10-300	±10g	486,4	mV/g
		AM39	z	10-400	±10g	496,9	mV/g
		AM40	z	10-400	±10g	487,0	mV/g
		AM41	z	10-400	±10g	493,9	mV/g
		AM42	z	10-400	±10g	480,3	mV/g
		AM43	z	10-351	±10g	493,3	mV/g
		AM44	z	20-350	±5g	489,173	mV/g
		AM45	z	20-450	±5g	985,04858	mV/g
À1m		A46V	z	0,2-4800	±20g	100	mV/g
		A46L	x	0,2-4800	±20g	100	mV/g
		A46T	y	0,2-4800	±20g	100	mV/g
À2m		A47V	z	0,2-4800	±20g	100	mV/g
		A47L	x	0,2-4800	±20g	100	mV/g
		A47T	y	0,2-4800	±20g	100	mV/g
À1m		G48V	z	2122	2,01 Hz	70,7	V/m/s
		G48L	x	2109	2,01 Hz	77,1	V/m/s
		G48T	y	2104	1,99 Hz	73,3	V/m/s

B Compléments sur l'expérimentation

Tableau B.12 – Récapitulatif des capteurs horizontaux de la planche 2 dans les plots compacté et foisonné

Zone instrumentée		Appellation capteur	Caractéristiques boîtier 2				
			Voie	BP (Hz)	EM	Sensibilité	Unité
Sur ballast		A1V	z	20-6000	$\pm 10g$	500	mV/g
		A1L	x	20-6000	$\pm 10g$	482	mV/g
		A1T	y	20-6000	$\pm 10g$	478	mV/g
		A2V	z	20-6000	$\pm 25g$	44,68	mV/g
		A2L	x	20-6000	$\pm 25g$	44,74	mV/g
		A2T	y	20-6000	$\pm 25g$	27,59	mV/g
		A3V	z	20-6000	$\pm 25g$	21,9	mV/g
		A3L	x	20-6000	$\pm 25g$	23,88	mV/g
		A3T	y	20-6000	$\pm 25g$	27,59	mV/g
		A4V	z	20-6000	$\pm 25g$	24,56	mV/g
		A4L	x	20-6000	$\pm 25g$	23,19	mV/g
		A4T	y	20-6000	$\pm 25g$	24,54	mV/g
		A5V	z	20-6000	$\pm 25g$	23,76	mV/g
		A5L	x	20-6000	$\pm 25g$	22,63	mV/g
		A5T	y	20-6000	$\pm 25g$	23	mV/g
		A6V	z	10-1000	$\pm 20g$	198	mV/g
		A6L	x	10-1000	$\pm 20g$	198,9	mV/g
		A6T	y	10-1000	$\pm 20g$	196,7	mV/g
		A7V	z	0,2-4800	$\pm 20g$	100	mV/g
		A8V					
		A9V					
		A10V					
		A11V					
		A12V					
		A13V					
		A14V					
		A15V					
		A16V					
		A17V					
		A18V					
		A19V					
		A20V					
		A21V					
		A22V					
		A23V					
		A24V					
		A25V					
Dans ballast	90cm	A26V	z	10-1000	$\pm 20g$	199,1	mV/g
		A26L	x	10-1000	$\pm 20g$	198,5	mV/g
		A26T	y	10-1000	$\pm 20g$	197,3	mV/g
	60cm	A27V	z	10-1000	$\pm 20g$	197,6	mV/g
		A27L	x	10-1000	$\pm 20g$	197,5	mV/g
		A27T	y	10-1000	$\pm 20g$	198,0	mV/g
	60cm	A28V	z	100	$\pm 10g$	200	mV/g
		A28L	x	100	$\pm 10g$	200,2	mV/g
		A28T	y	100	$\pm 10g$	200,35	mV/g

B.2 Inventaire des caractéristiques des capteurs de l'expérimentation

Tableau B.13 – Récapitulatif des capteurs horizontaux de la planche 2 dans les plots compacté et foisonné

Zone instrumentée	Appellation capteur	Caractéristiques boîtier 3			
		Voie	BP (Hz)	Sensibilité	Unité
Sur ballast	G1V	z	100-1000	35	V/m/s
	G1L	z	100-1000	35	V/m/s
	G1T	z	100-1000	33	V/m/s
	G2V	z	100-1000	35	V/m/s
	G2L	z	100-1000	35	V/m/s
	G2T	z	100-1000	34	V/m/s
	G3V	z	100-1000	35	V/m/s
	G3L	z	100-1000	35	V/m/s
	G3T	z	100-1000	34	V/m/s
	G4V	z	100-1000	34	V/m/s
	G4L	z	100-1000	35	V/m/s
	G4T	z	100-1000	35	V/m/s
	G5V	z	100-1000	35	V/m/s
	G5L	z	100-1000	34	V/m/s
	G5T	z	100-1000	34	V/m/s
	G6V	z	100-1000	34	V/m/s
	G6L	z	100-1000	34	V/m/s
	G6T	z	100-1000	35	V/m/s
	G7V	z	100-1000	34	V/m/s
	G7L	z	100-1000	35	V/m/s
	G7T	z	100-1000	34	V/m/s
	G8V	z	100-1000	33	V/m/s
	G8L	z	100-1000	34	V/m/s
	G8T	z	100-1000	33	V/m/s
	G9V	z	4,5-500	23,7	V/m/s
	G10V	z	4,5-500	25,1	V/m/s
	G11V	z	4,5-500	24,7	V/m/s
	G12V	z	4,5-500	25,2	V/m/s
	G13V	z	4,5-500	24,1	V/m/s
	G14V	z	4,5-500	25,5	V/m/s
	G15V	z	4,5-500	25,2	V/m/s
	G16V	z	4,5-500	24,2	V/m/s
	G17V	z	4,5-500	25,2	V/m/s
	G18V	z	4,5-500	23,8	V/m/s
	G19V	z	4,5-500	25,2	V/m/s
	G20V	z	4,5-500	25	V/m/s
	G21V	z	4,5-500	24,9	V/m/s
	G22V	z	4,5-500	25	V/m/s
	G23V	z	4,5-500	24,4	V/m/s
	G24V	z	4,5-500	24,1	V/m/s

B Compléments sur l'expérimentation

Tableau B.14 – Récapitulatif des capteurs verticaux de la planche 2 dans le plot foisonné

Zone instrumentée		Appellation capteur	Voie	Caractéristiques			
				BP (Hz)	EM	Sensibilité	Unité
Source	Disque	A25V	z	1-20000	$\pm 5000g$	1,00	mV/g
		A25L	x	?	$\pm 100g$	96,4	mV/g
		A25T	y	20-1000	$\pm 50g$	96,4	mV/g
	Bastaing	A25V	z	0,2-15000	$\pm 50g$	100	mV/g
		A25L	x	0,2-15000	$\pm 50g$	100	mV/g
		A25T	y	0,2-15000	$\pm 50g$	100	mV/g
	V.P	A25V	z	0,2-15000	$\pm 50g$	100	mV/g
		A25L	x	0,2-15000	$\pm 50g$	100	mV/g
		A25T	y	0,2-15000	$\pm 50g$	100	mV/g
	V.I	A25V	z	0,2-15000	$\pm 50g$	100	mV/g
		A25L	x	0,2-15000	$\pm 50g$	100	mV/g
		A25T	y	0,2-15000	$\pm 50g$	100	mV/g
Ballast	90cm	A26V		10-1000	$\pm 20g$	196,8	mV/g
		A26L		10-1000	$\pm 20g$	196,8	mV/g
		A26T		10-1000	$\pm 20g$	197,3	mV/g
	75cm	A27V		10-1000	$\pm 20g$	197	mV/g
		A27L		10-1000	$\pm 20g$	198,1	mV/g
		A27T		10-1000	$\pm 20g$	196,1	mV/g
	60cm	A28V		100	$\pm 10g$	199,8	mV/g
		A28L		100	$\pm 10g$	200	mV/g
		A28T		100	$\pm 10g$	200,156	mV/g
	45cm	A29V		96,4	$\pm 10g$	200,25	mV/g
		A29L		100	$\pm 10g$	99,2	mV/g
		A29T		100	$\pm 10g$	98	mV/g
	30cm	A30V		10-600	$\pm 20g$	196,2	mV/g
		A30L		10-500	$\pm 20g$	197,5	mV/g
		A30T		10-400	$\pm 20g$	197,4	mV/g
À1m		A46V	z	0,2-4800	$\pm 20g$	100	mV/g
		A46L	x	0,2-4800	$\pm 20g$	100	mV/g
		A46T	y	0,2-4800	$\pm 20g$	100	mV/g
À2m		A47V	z	0,2-4800	$\pm 20g$	100	mV/g
		A47L	x	0,2-4800	$\pm 20g$	100	mV/g
		A47T	y	0,2-4800	$\pm 20g$	100	mV/g
À1m		G48V	z	8828	2,13 Hz	74,49	V/m/s
		G48L	x	8369	1,98Hz	73,17	V/m/s
		G48T	y	8492,67	2,12Hz	74,03	V/m/s

B.3 Étalonnage des capteurs en amplitude et phase

B.3.1 Objectif

Les géophones de fréquence propre 4,5 et 100 Hz utilisés au cours des essais de propagation d'ondes doivent faire l'objet d'un étalonnage afin de vérifier leur réponse dans une bande de fréquence utile. Un géophone de chaque type a été testé. Dans ce contexte, et pour écarter des résultats incompréhensibles liés au fonctionnement des capteurs, ils ont été testés sur un pot vibrant avec des fréquences variant de 100 à 1000 Hz. Les ondes de surface utilisent l'amplitude des ondes mais également la phase. De ce fait, les résultats se présentent sous la forme de spectre d'amplitude et de phase. L'étalonnage repose sur une boucle d'asservissement. En effet, nous tenons à avoir une accélération constante pour un balayage en fréquence dans la gamme 100-1000 Hz alors que l'accélération augmente avec la fréquence selon la relation suivante :

Accélération $\gamma = A\omega^2$ avec la pulsation $\omega = 2\pi f$ d'où $\omega = A(2\pi f)^2$

La commande d'excitation émettra une valeur d'accélération constante (valeur de consigne) même lors d'un changement de fréquence. Ces informations sont conduites et amplifiées vers le pot vibrant 4808 qui émet des vibrations et permet ainsi aux accéléromètres d'être excités.

B.3.2 Description du matériel

Géophones Un géophone est un capteur qui transforme le mouvement du sol en courant électrique. Il comporte un ressort et une masse magnétique se déplaçant dans une bobine de fil, générant ainsi un signal électrique proportionnel à la vitesse du déplacement. Les auscultations in situ d'onde de surface pour des profondeurs d'auscultation de plusieurs dizaines de mètres se font au moyen de géophones de fréquence propre 4,5 Hz. Dans le cas présent, l'investigation concerne une profondeur maximale de 30 cm voir 1 m de ballast. À ces profondeurs, les fréquences utiles sont plus élevées, d'où l'utilisation de géophones de fréquence propre 100 Hz (figure B.16). Le constructeur fournit une courbe de réponse en fonction de la fréquence. Dans le cas d'un géophone 4,5 Hz (figure B.16), la fréquence maximale du certificat d'étalonnage atteint 200 Hz et pour un géophone 100 Hz, elle atteint 1000 Hz. Cette limite est inférieure à la bande utile du capteur ; le constructeur ne voulant pas s'engager car au delà de cette gamme de fréquences, il peut y avoir des problèmes de distorsion et d'atténuation du signal. Le géophone 100 Hz a été fixé en premier lieu par vissage sur la platine du pot vibrant. Les résultats obtenus montrent des fréquences de résonance liées à la fixation.

Dans ce contexte, l'étalonnage a été réalisé sur une unité du géophone

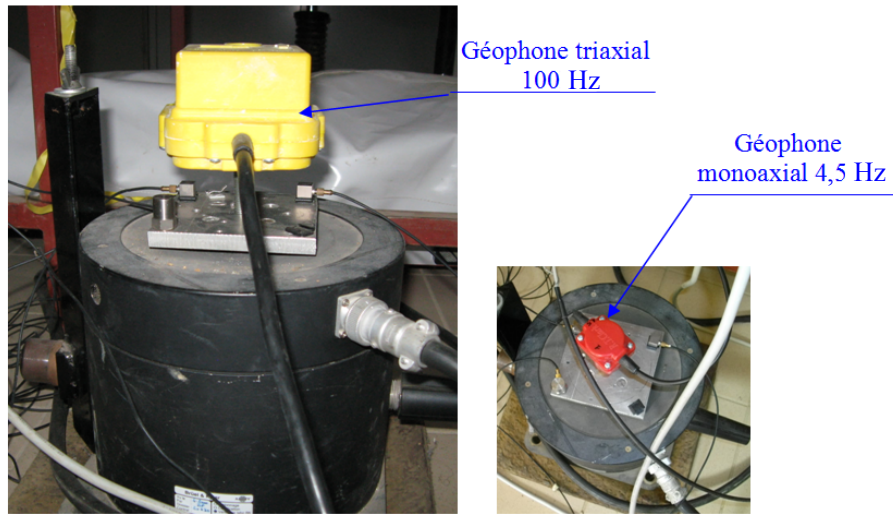


Figure B.16 – Géophones vissés sur le pot vibrant au moyen d'une tige filetée

RTC100 (figure B.17) avec des pièces de serrage. Le géophone 4,5Hz a été vissé sur la platine par sa tige propre ne générant pas de mouvement de la fixation.

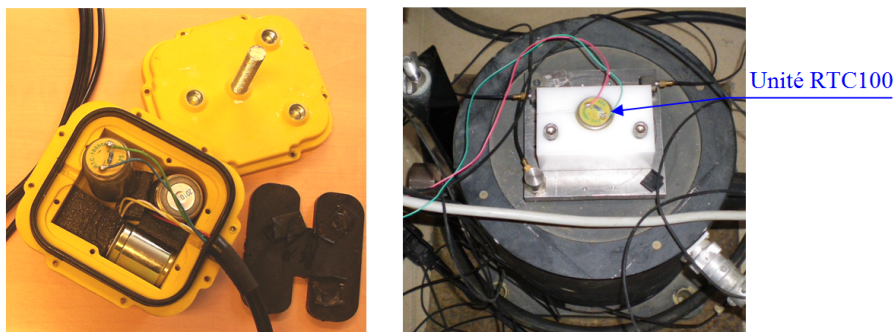


Figure B.17 – Unité RTC100 fixée sur le support du pot vibrant

B.3 Étalonnage des capteurs en amplitude et phase

Accéléromètres Trois accéléromètres sont utilisés pour la réalisation de cet étalonnage :

- un accéléromètre de référence de marque Brüel & Kjaer n° 921 (noté acc),
- un accéléromètre pilote Brüel & Kjaer n° 812 308,
- un accéléromètre de marque Brüel & Kjaer n° 920 intégré une fois (noté accI).

L'accéléromètre de référence permet de comparer la consigne du pot vibrant (accéléromètre pilote) à une valeur vraie et ainsi permettre d'asservir automatiquement un système de régulation. Les caractéristiques du pot vibrant sont données dans la figure B.15. Il est alimenté au moyen d'un conditionneur Nexus de la marque Brüel & Kjaer. Ce boîtier permet également de faire le conditionnement et l'intégration du troisième accéléromètre afin d'obtenir directement une vitesse en m/s.

Pot vibrant et asservissement Le pot vibrant est piloté par une commande d'excitation Brüel & Kjaer (n° 1047) mettant en mouvement le pot vibrant de 15 Hz à 25 kHz et d'un amplificateur ayant pour rôle de générer des boucles d'asservissement fermées. L'accélération maximale dépend de la masse que supporte le pot vibrant.

Tableau B.15 – Caractéristiques du pot vibrant

Gamme de fréquence	15 Hz-25 kHz
Suspension de résonance	150 Hz
Fréquence de résonance	12 kHz
Accélération limite	700 m/s ²
Vitesse limite	1,4 m/s
Déplacement limite	12,7 mm
Force	112 N

B.3.3 Méthodes de mesure

Le pot vibrant est soumis à une vibration sinusoïdale en boucle ouverte pour les essais du géophone 4,5 Hz c'est-à-dire que pour chaque fréquence un réglage est réalisé afin de garantir une amplitude constante (réglage fait au moyen de l'oscilloscope). Pour les étalonnages du géophone triaxial 100 Hz et de l'unité RTC100, la sollicitation du pot vibrant est faite en boucle fermée avec un niveau de vitesse défini (5 ou 10 mm/s).

B Compléments sur l'expérimentation

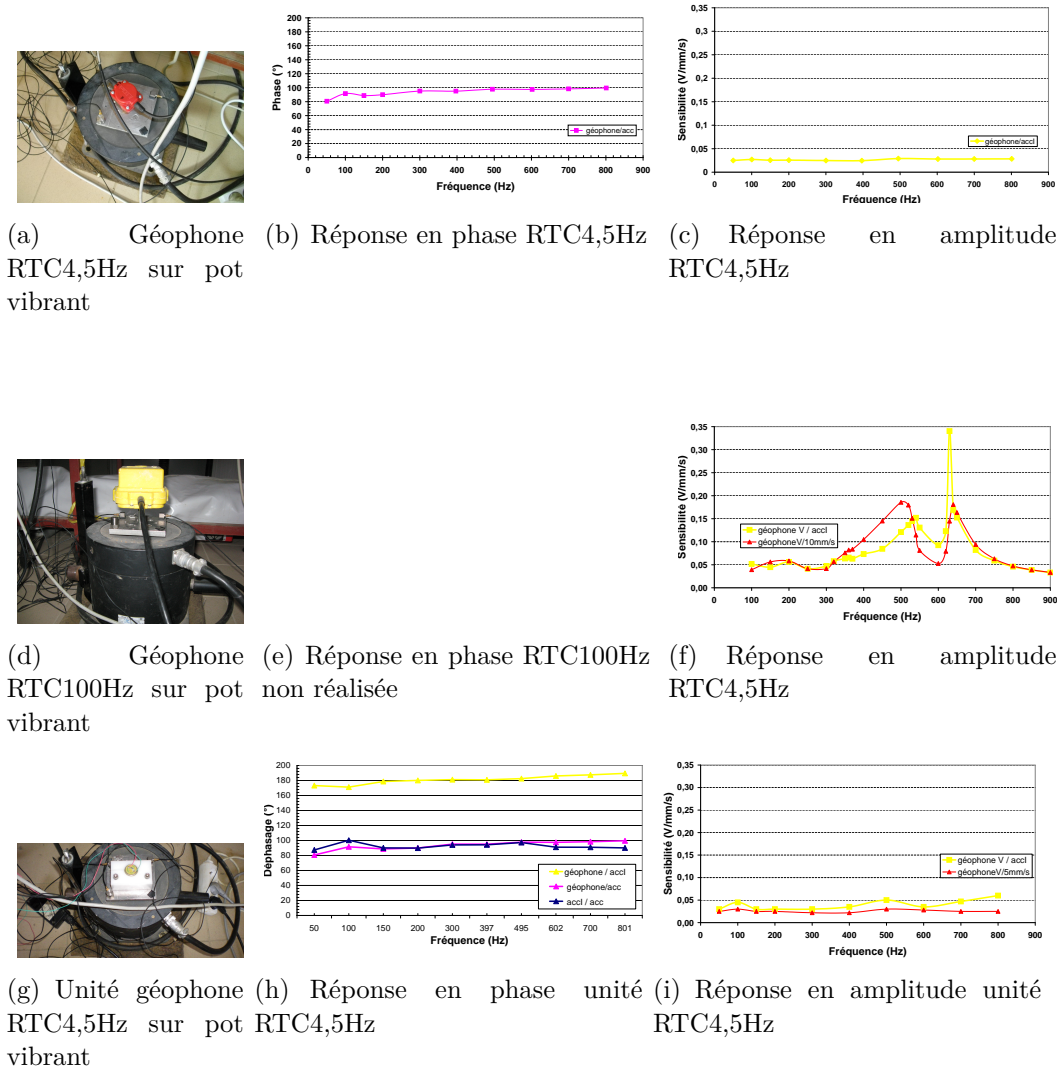


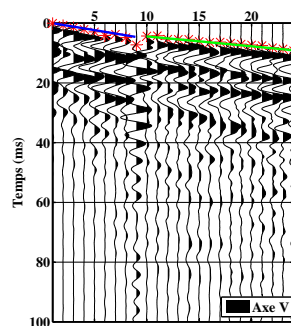
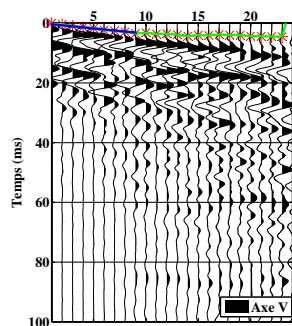
Figure B.18 – Calibration des géophones sur pot vibrant

B.3.4 Résultats obtenus

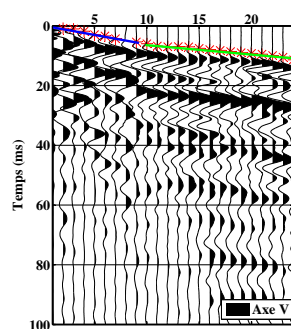
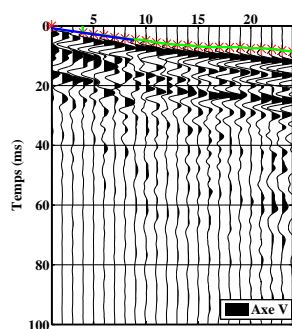
Les résultats de la figure B.18 indiquent que les géophones 4,5 Hz répondent normalement en amplitude et en phase de 50 à 800 Hz. Ils peuvent être ainsi utilisés pour des essais avec cette gamme de fréquences. Les géophones 100 Hz vissés sur le pot vibrant ne répondent pas correctement en amplitude; la fixation générant des fréquences de résonance. Dans ce contexte, une unité du géophone 100 Hz a été démontée et fixée sur la plaque du pot vibrant au moyen d'une cale. Dans cette configuration le capteur répond normalement de 50 à 800 Hz. De la même façon, ces capteurs peuvent être utilisés dans cette gamme de fréquence. Pour information, l'IFSTTAR de Nantes a étalonné des géophones 100 Hz sur une table vibrante. Ils ont eu une réponse en amplitude normale jusqu'à 2 kHz et en phase jusqu'à 1,5 kHz.

B.4 Courbes d'arrivée des ondes - variation épaisseur/compacité du ballast

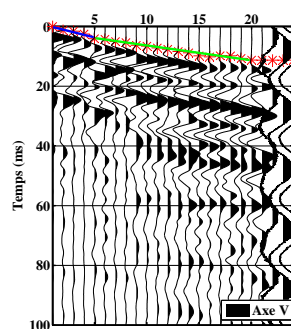
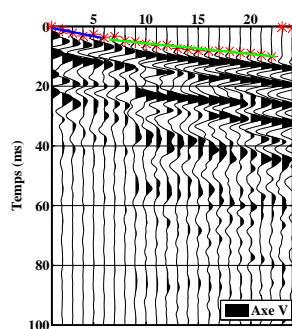
Les principaux résultats des courbes sismiques mettant en évidence les paramètres "épaisseur des couches de ballast" et "compacité" figurent ci-après.



(a) Compacté - 30 cm de ballast (b) Foisonné - 30 cm de ballast



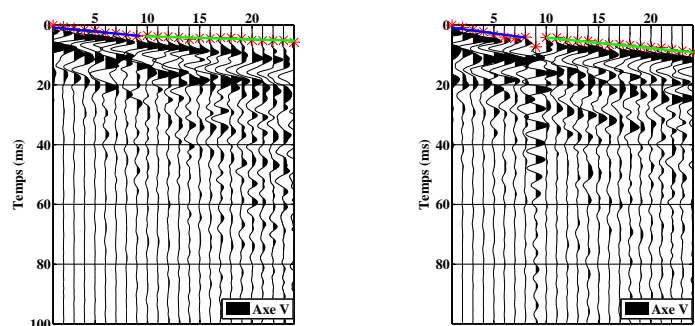
(c) Compacté - 60 cm de ballast (d) Foisonné - 60 cm de ballast



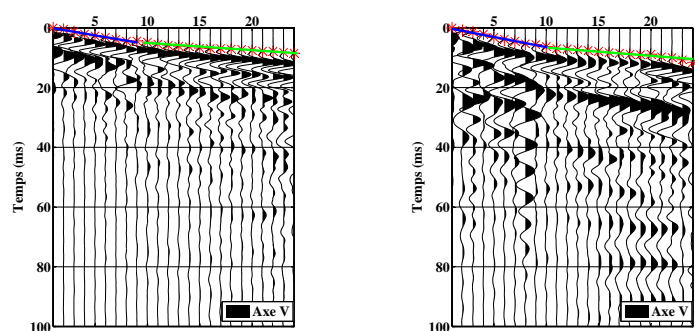
(e) Compacté - 90 cm de ballast (f) Foisonné - 90 cm de ballast

Figure B.19 – Graphes des arrivées des ondes sismiques - Marteau V - Offset de 25 cm

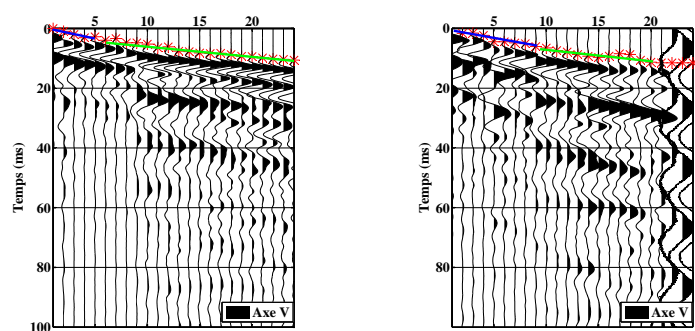
B.4 Courbes d'arrivée des ondes - variation épaisseur/compacité du ballast



(a) Compacté - 30 cm de ballast (b) Foisonné - 30 cm de ballast



(c) Compacté - 60 cm de ballast (d) Foisonné - 60 cm de ballast



(e) Compacté - 90 cm de ballast (f) Foisonné - 90 cm de ballast

Figure B.20 – Graphes des arrivées des ondes sismiques - chute de masse - Offset de 25 cm

B.5 Traitement des vibrateurs par corrélation

En sismique, l'utilisation de sources vibratoires continues conduit à des spectres en fréquence peu larges, à la différence des sources impulsionnelles qui sont caractérisées par un spectre large bande. Dans le cas d'une source ponctuelle, le signal du géophone $s(t)$ peut être défini par le produit de convolution du signal émis $e(t)$ par la réponse impulsionnelle du milieu $h(t)$ auquel s'ajoute le bruit lié à l'environnement $b(t)$.

$$s(t) = h(t) * e(t) + b(t) \quad (\text{B.3})$$

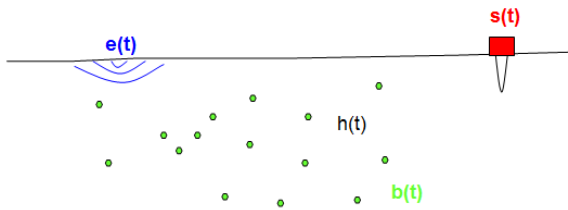


Figure B.21 – Fonction de transfert source - récepteur

Dans le cas de sources entretenues, la détection de l'arrivée des ondes peut être possible en corrélant le signal du géophone avec le signal émis. La corrélation des enregistrements récepteurs par la matrice symétrique du signal émis d'une source continue doit être opérée afin de définir la réponse impulsionnelle du milieu $r(t)$.

$$r(t) = s(t)e(-t) \quad (\text{B.4})$$

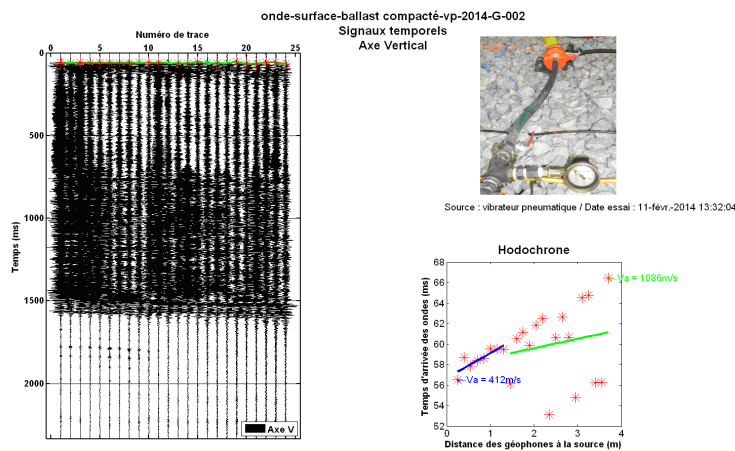


Figure B.22 – Exemple de résultat sur l'arrivée des ondes avec les vibrateurs

B.5 Traitement des vibreurs par corrélation

Comme nous le visualisons sur la figure B.22, il est difficile de pointer avec la méthode traditionnelle l'arrivée des ondes des vibreurs comme avec les sources ponctuelles (figure 3.24).

Ce traitement consiste à passer dans le domaine fréquentiel car, dans ce cas, le produit de convolution de deux fonctions est équivalent au produit de chaque fonction du domaine fréquentiel. Ce traitement permet ainsi d'obtenir un signal ponctuel dans le temps pour un signal vibratoire continu. Les figures B.23 et B.24 permettent de visualiser le traitement d'un essai avec et sans corrélation d'une source entretenue.

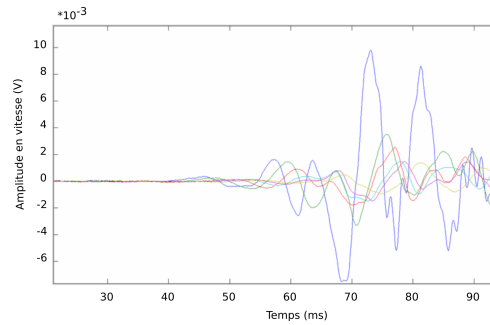
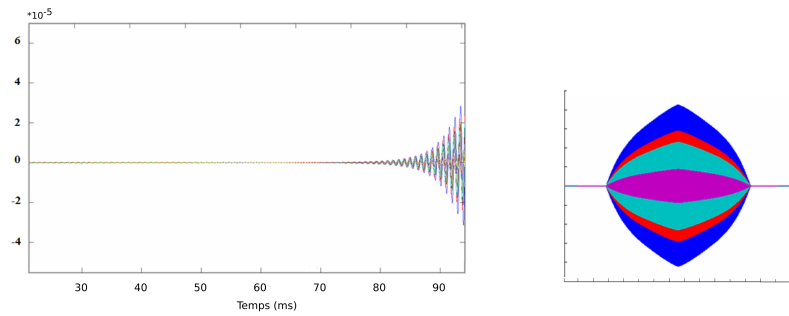


Figure B.23 – Zoom sur un exemple de signal d'un vibreur pneumatique



(a) Zoom de l'enregistrement d'un vibreur

(b) Forme en losange

Figure B.24 – Exemple de traitement par corrélation

Le traitement conduit à une forme de signal en losange caractéristique de la corrélation, ramenant ainsi une source entretenue à une source impulsionnelle non dépendante de la vibration continue (figure B.24). En regardant de plus près, nous constatons que le signal corrélé est un signal périodique de forme sinusoïdale rendant ainsi la détection de l'arrivée complexe. Un premier

traitement a été réalisé en détectant les maxi des pics de corrélation. La fréquence de ces signaux est de 99,5 - 100 Hz suivant les cas, ce qui conduit à maxima un déphasage de l'arrivée de l'onde en détectant par cette méthode de calcul. Ce phénomène doit probablement provenir du fait de la fréquence d'échantillonnage insuffisante pour ces traitements (20 kHz). Si l'on détecte le pic avec un point de décalage, cela conduit à une erreur en fréquence de 0,5 Hz, ce qui ne permet pas de faire ce type de traitement dans les conditions de ces essais. Pour faciliter le dépouillement, nous avons déterminé l'arrivée de l'onde en détectant le maximum de chaque courbe corrélée ainsi que les indices des maxima pour calculer la vitesse. Néanmoins ce traitement ne conduit pas à des résultats satisfaisants pour détecter l'arrivée de l'onde des vibrateurs. En effet, l'hodochrone obtenu est une courbe non linéairement décroissante liée en partie à la fréquence d'échantillonnage des essais.

B.6 Méthodes H sur V évènement et H sur V bruit de fond

La détection des effets de site est couramment utilisée en sismologie afin de déterminer les paramètres d'amplification sismique par la mesure de séismes (méthode des fonctions récepteurs ou méthode H sur V évènement) ou par la mesure du bruit de fond sismique (méthode H sur V bruit de fond, [Duval \(1996\)](#)).

Les effets de site sont responsables de l'augmentation des dommages pendant les séismes. Ils amplifient localement les séismes et augmentent la durée de la sollicitation suite à un phénomène de mise en résonance.

Dans notre cas, nous souhaitons voir la faisabilité de la méthode H sur V évènement dans un contexte à faible épaisseur et donc à fréquence élevée et ainsi voir si l'état de serrage du ballast (compacté ou foisonné) pourrait engendrer un décalage du pic de résonance. M. Brulé a mis en évidence le compactage dynamique d'un remblai de grande hauteur ([Brulé & Javelaud, 2010](#); [Brulé et al., 2010](#)) par le décalage du pic de résonance. Cette méthode peut trouver un intérêt avec le contraste d'impédance élevé entre le ballast et le reste de la structure.

B.6.1 Résultats des fonctions récepteurs ou H sur V évènement

En première approche, sur une large bande fréquentielle (de 0 à 4000 Hz), les géophones triaxiaux de la planche 1 présentent des pics de résonance à fréquence élevée. Ces derniers ne peuvent pas être une réponse du sol mais plutôt la signature de la source même si les résultats sont répétables quelle que soit la source (marteau vertical et vibrateurs) avec un pic du plot foisonné

B.6 Méthodes H sur V évènement et H sur V bruit de fond

à 1000 Hz et à 1500 Hz pour le plot compacté (figure B.25). La fréquence est beaucoup trop élevée par rapport aux valeurs attendues définies à partir de la relation d'Aki (équation 3.2). De plus, il faut rappeler que ces pics se trouvent à la limite de la mesure des géophones.

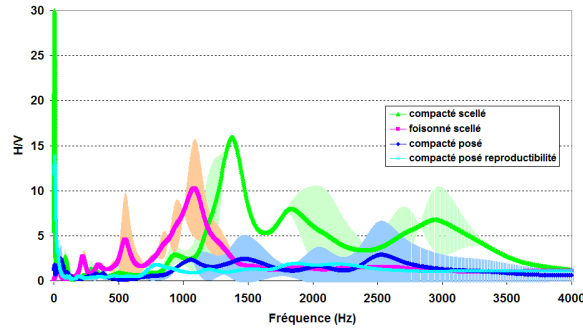


Figure B.25 – Rapport spectraux H / V évènement - planche 1 - marteauV - offset 25 - 0 Hz < f < 4000 Hz

En zoomant et en se plaçant dans la gamme de fréquence attendue, deux pics sont visibles, à 40 Hz pour le plot foisonné et à 90 Hz pour le plot compacté avec une harmonique visible à 230 et 290 Hz. Cette piste semblerait intéressante (B.26). Néanmoins, la moyenne des différents offsets pour un même géophone triaxial va infirmer ces résultats B.28. En effet, nous ne retrouvons pas systématiquement ces pics suivant la position des capteurs.

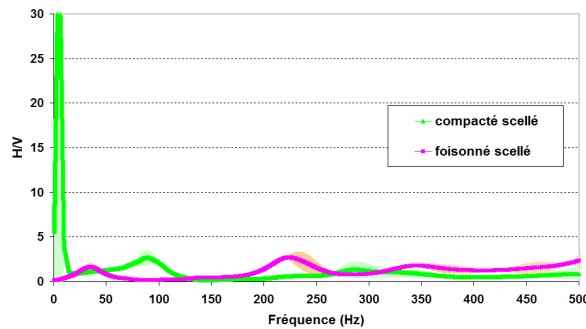


Figure B.26 – Rapport spectraux H/V évènement - planche 1 - marteauV - offset 25 - 0 < f < 500 Hz

L'effet du couplage des capteurs est étudié en comparant la réponse des différents géophones triaxiaux. Pour chaque position de capteur, une moyenne des différents offsets à la source est réalisée afin d'étudier la pertinence de ce traitement.

Le traitement des rapports spectraux des voies horizontales sur la voie verticale a été effectué en 2 étapes :

B Compléments sur l'expérimentation

- détermination du rapport H sur V événement (figure B.27) résultant de la moyenne des courbes obtenus pour les géophones 1 à 8 à partir des matrices récupérées sous geopsy. Les résultats des différents géophones devraient donner la même réponse. Ces variations de pic indiquent qu'il y a un problème de couplage des éléments les uns par rapport aux autres. Ces résultats ne dégagent pas une tendance à un pic de résonance mais plutôt une variation du pic en fonction de la position du géophone et du couplage (présence de trous ou pas sous le géophone plâtré) ;

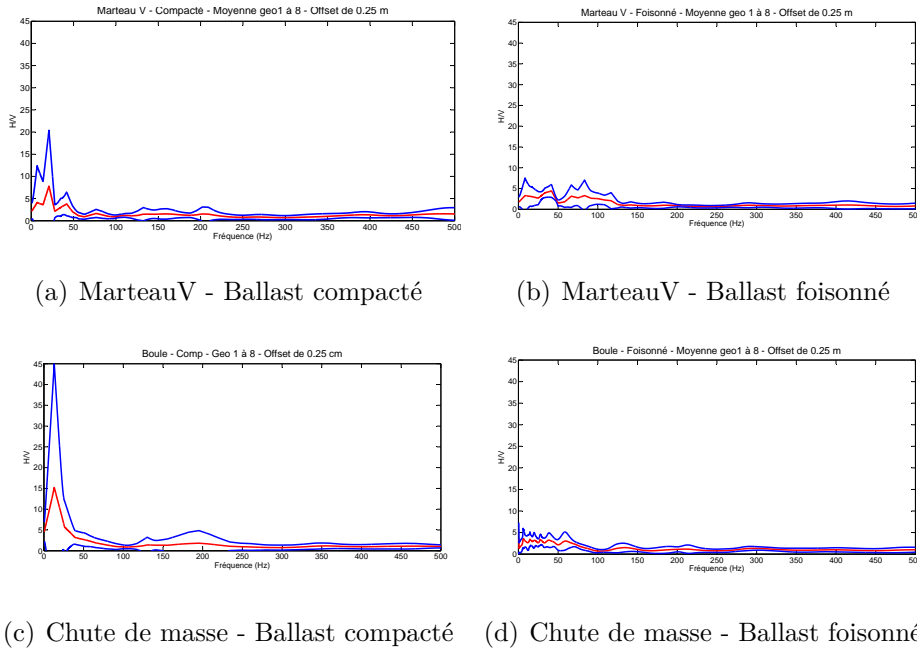
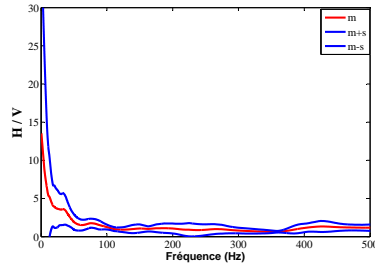


Figure B.27 – Moyenne des rapports spectraux H sur V des géophones 1 à 8 - planche 2 - 30 cm de ballast

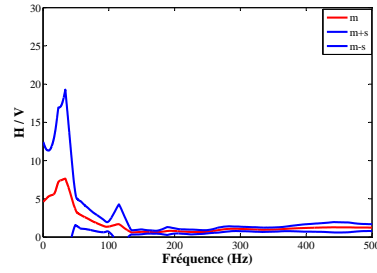
Dans ce contexte, il est intéressant de faire la moyenne de tous les essais à différents offsets pour un même géophone.

- Détermination du rapport H sur V événement résultant de la moyenne des courbes obtenus pour un géophone donné à partir des matrices récupérées sous geopsy (figures B.28). Ce traitement montre que l'on mesure une réponse similaire sur un même géophone en faisant varier l'offset.

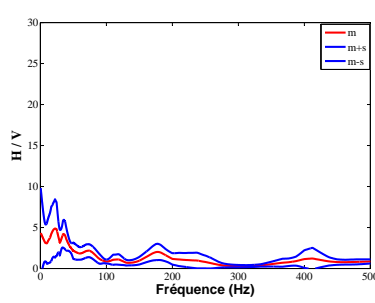
B.6 Méthodes H sur V évènement et H sur V bruit de fond



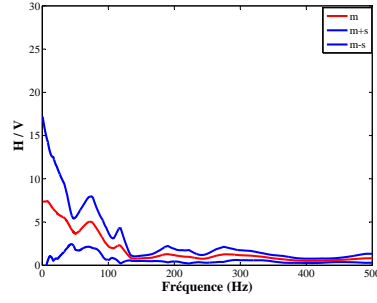
(a) Compacté - Géophone 1 - 18 essais



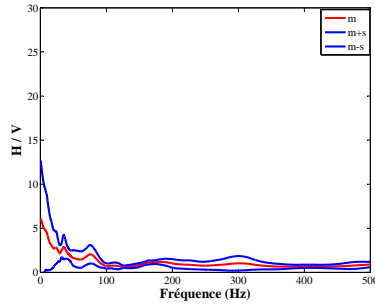
(b) Foisonné - Géophone 1 - 23 essais



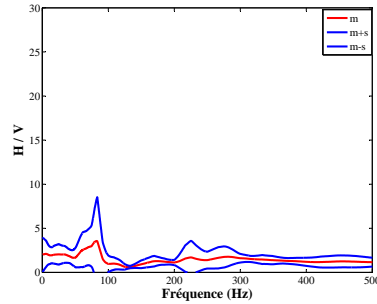
(c) Compacté - Géophone 2 - 17 essais



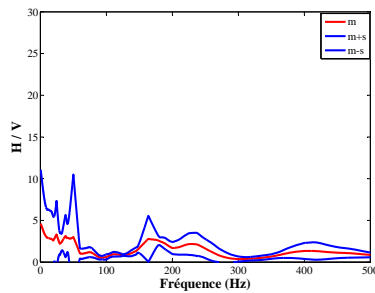
(d) Foisonné - Géophone 2 - 23 essais



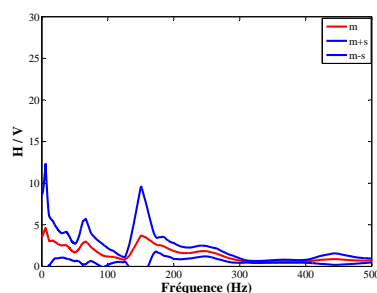
(e) Compacté - Géophone 3 - 18 essais



(f) Foisonné - Géophone 3 - 23 essais



(g) Compacté - Géophone 4 - 18 essais



(h) Foisonné - Géophone 4 - 23 essais

Figure B.28 – Moyenne des rapports spectraux H sur V des différents essais des géophones 1 à 4 - planche 1 - 30 cm de ballast compacté (graphes a), c), e), g) - 30 cm de ballast foisonné (graphes b), d), f), h)

B.6.2 Résultats des mesures de bruit de fond sismique

L'intérêt de cette méthode tient au fait que l'on ne se soucie pas de la source. Les géophones n'étant pas très sensibles, nous avons généré du bruit de fond sismique en marchant à côté de la flûte de géophones. Les mesures ont été faites avec une fréquence d'échantillonnage de 20 kHz, conduisant à une durée de 70 s jusqu'à saturation de la mémoire vive du système d'acquisition.

La théorie du H sur V s'applique à tous les types d'ondes (volume, surface) avec une préférence pour les basses fréquences. Les résultats des géophones montrent une fréquence équivalente à $\frac{V_S}{4H}$ pour certains capteurs avec des harmoniques à $3\frac{V_S}{4H}, 5\frac{V_S}{4H} \dots$

La longueur des fenêtres du bruit de fond est fonction des fréquences que l'on veut déterminer. Si l'on a une fréquence 50 Hz, il faut prévoir une durée des fenêtres de $\frac{1}{50}$ soit 200 ms ; sinon, il est possible de fenêtrer par rapport à la période du signal en prenant une fenêtre correspondant à 25 fois la période.

B.6.3 Crosscorrélation

Les différentes expérimentations menées au CER montrent que la propagation au sein du ballast est complexe et ne répond pas aux équations de milieu continu comme on pouvait s'y attendre. Il n'a pas été possible à partir des méthodes existantes répondant aux équations de propagation d'un milieu élastique linéaire, de trouver un indicateur mesurable pour étudier la compacité du ballast tant la mesure est dispersée sur le ballast et tant l'écart mesuré est faible et peu discriminant. Ce travail expérimental nécessite un travail complémentaire qui ne pourra être traité faute de temps. Il consiste à étudier le traitement sismique des enregistrements par crosscorrélation sur un bruit de fond généré (figure B.29) et par analyse de la coda (Larose, 2006), méthode intéressante pour caractériser le caractère discret du milieu et ainsi voir la faisabilité des méthodes pour l'étude du serrage du ballast ferroviaire.

Une traitement de cross corrélation du bruit entre les capteurs de la flûte sismique a été réalisé (D'Ter Nice, Diego Mercerat) permettant ainsi de remonter à l'onde qui se propage. En général ce sont des ondes de surface surtout lorsque l'on génère du bruit. On compare les géophones 2 par 2 et l'on fait une moyenne des informations récupérées entre les différents capteurs. À partir de ces mesures il est possible de remonter à la courbe de dispersion sur la partie basse fréquence. Ces mesures de sismique passive nécessitent d'avoir un temps élevé d'enregistrement afin d'augmenter la résolution dans les basses fréquences. La distance entre le premier et le dernier géophone de la flûte sismique doit être conséquente (vérifier si la longueur actuelle de 3 m est suffisante). La durée des enregistrement de 70 s n'est pas suffisante pour ce traitement même si l'on voit néanmoins des résultats prometteurs. Il semblerait que cette méthode soit adaptée à la problématique d'un milieu discret,

B.6 Méthodes H sur V évènement et H sur V bruit de fond

plus que les méthodes avec des sources actives. Ce travail nécessite une recherche plus conséquente et des mesures complémentaires qui ne pourront pas être traitées dans ce travail de doctorat mais cette piste sera poursuivie dans un second temps. Trois modalités de bruit ont été testés pour ces traitements :

- bruit ambiant,
- bruit généré en marchant autour des géophones,
- bruit généré en tapant par ci par là autour de la planche expérimentale.

La configuration répondant le mieux est celle en générant du bruit en marchant autour de la flûte sismique. la comparaison entre le plot compacté et le plot foisonné donne des résultats intéressants (figure B.29) qu'il conviendra par la suite de poursuivre en améliorant le dispositif (durée d'enregistrement plus élevée en diminuant la fréquence d'échantillonnage) et en quantifiant la différence compacté/foisonné en réalisant des mesures entre les passes de compactage.

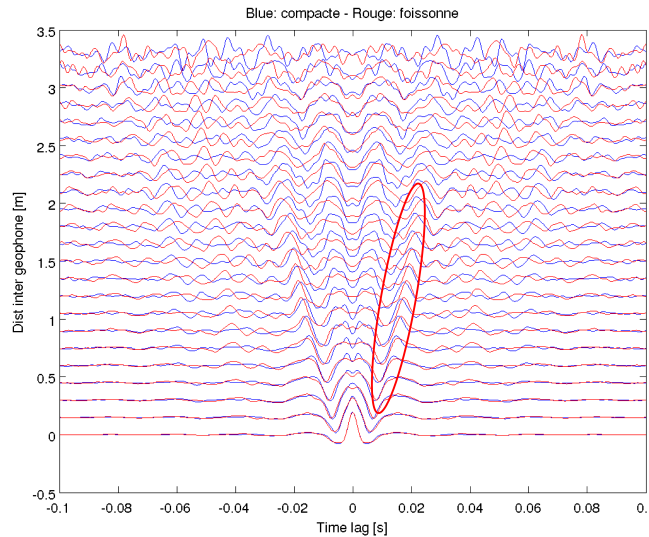


Figure B.29 – Résultat de cross corrélation sur la réponse des capteurs de la flûte de la planche 3

ANNEXE C

Compléments sur la modélisation

C.1 Quelques résultats expérimentaux du plot restreint de ballast - hauteur de chute de 30 cm - plaque posée

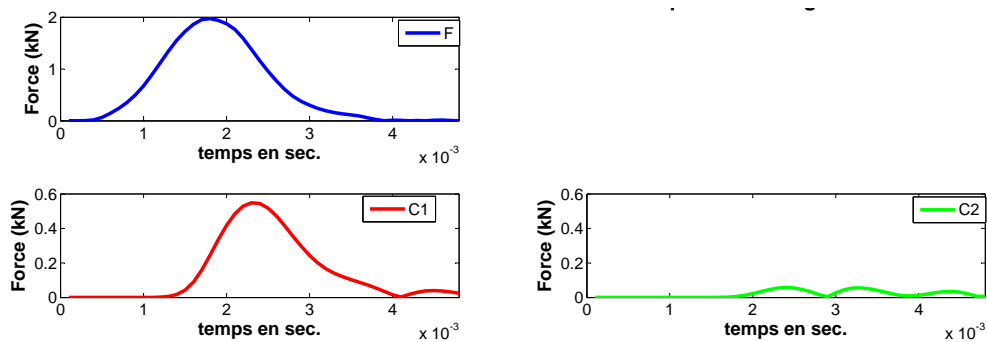


Figure C.1 – Plot de 15 cm de ballast compacté

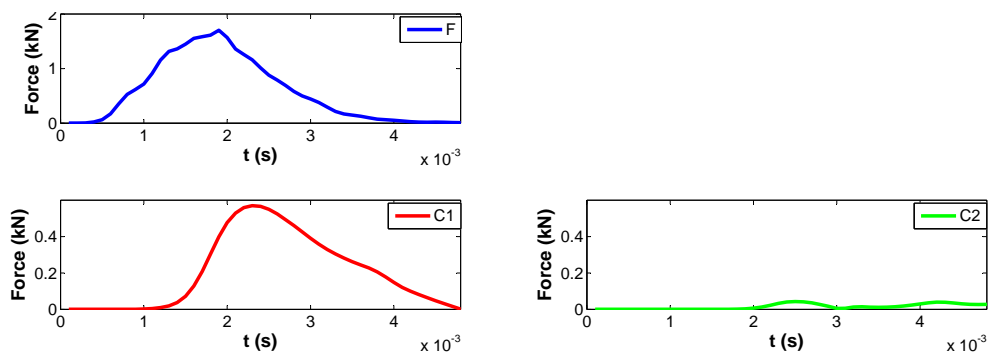


Figure C.2 – Plot de 15 cm de ballast foisonné

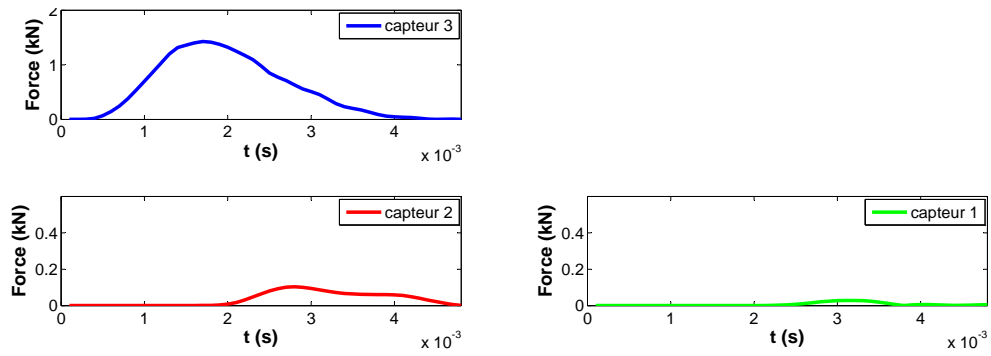


Figure C.3 – Plot de 30 cm de ballast compacté

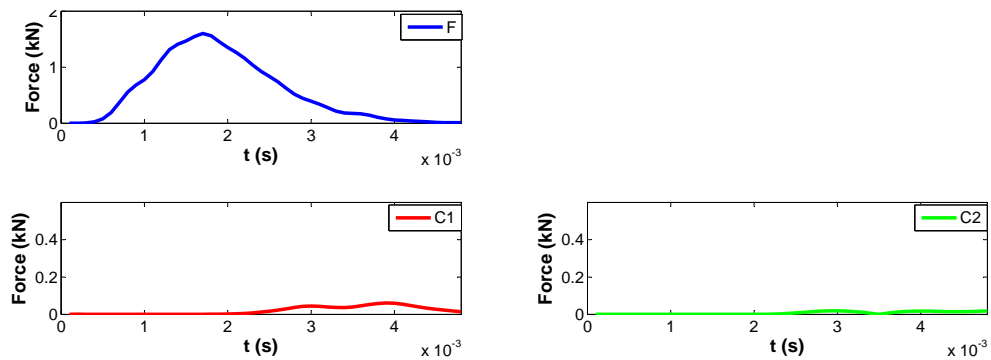


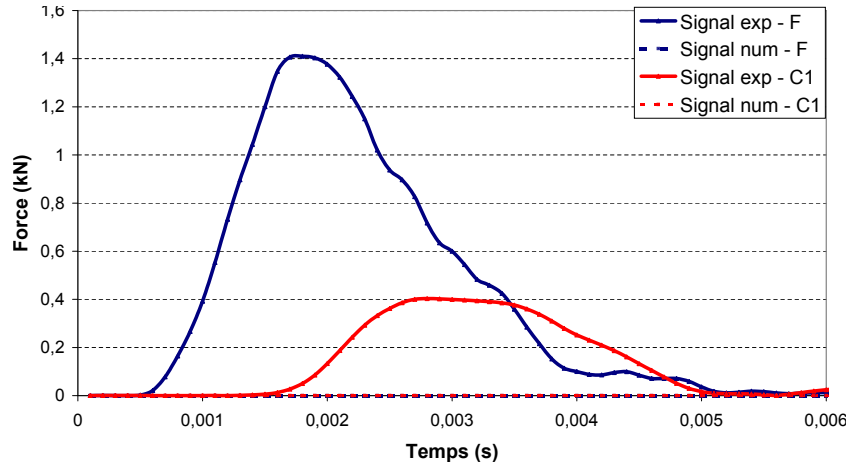
Figure C.4 – Plot de 30 cm de ballast foisonné

C.2 Paramètres de la modélisation

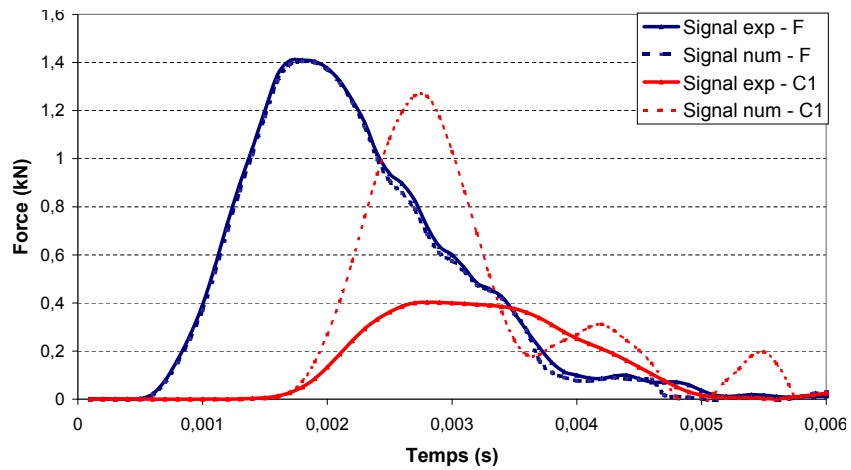
Tableau C.1 – Synthèse bibliographique des paramètres de la modélisation continue du ballast.

Paramètres modélisation	Valeurs pour le ballast	Sources bibliographiques
Masse volumique (t/m^3)	1,8 1,7 1,3-1,7 1,85 1,8 1,8	Zhai et al. (2004) Abdelkrim et al. (2004) Payeur et al. (2013) Al Shaer, Ali (2005) Galvin & Dominguez (2008) Nguyen (2002)
Module d'Young E (MPa)	110 25-250 450 8-200 20-200 270-630	Zhai et al. (2004) Abdelkrim et al. (2004) Payeur et al. (2013); Guérin (1996) Al Shaer, Ali (2005) Nguyen (2002) Fortunato (2005)
Coefficient de Poisson (ν)	0,3 0,2 0,2-0,4 0,3	Abdelkrim et al. (2004) Payeur et al. (2013) Al Shaer, Ali (2005) Galvin & Dominguez (2008)
Module (MN/m)	78,4 60-500 150-450 25 31,6	Zhai et al. (2004) Esveld (2001) Kaewunruen & Remennikov (2006) Kouroussis (2009) Sun & Dhanasekar (2000)
Amortissement (kNs/m)	58,8 57-20 140-270 100-300 21,8	Zhai et al. (2004) Esveld (2001) Kaewunruen & Remennikov (2005a) Kaewunruen & Remennikov (2005b) Sun & Dhanasekar (2000)
Amortissement ξ (kNs/m)	0,03-0,04 ;	Galvin & Dominguez (2008)
Coefficient d'amortissement η	0,002	Nguyen (2002)
Angle de répartition des contraintes ($^\circ$)	30 42	Zhai et al. (2004) Paderno (2010)
Perméabilité (mm/s)	>25	Selig & Waters (1994)
Indice des vides e	>0,7	Paderno (2010)
Constante diélectrique ε_r	3	Clark et al. (2001)
Fouling Index	<10	Selig & Waters (1994)

C.3 Calculs complémentaires par éléments finis



(a) $\alpha = 41, \beta = 0$ et $\alpha = 20, \beta = 2,58.10^{-5}$



(b) $\alpha = 0, \beta = 8.10^{-5}$

Figure C.5 – Résultats de la modélisation avec les coefficients définis selon le modèle de Maxwell généralisé - 15 cm de ballast foisonné - Forces mesurées et calculées à la source (F) et au point C1

Bibliographie

- M. Abdelkrim, et al. (2004). ‘Vers un outil de simulation par le calcul de structures du comportement à long terme d’une voie ferrée sous charge de trafic’. *Revue Française de Génie Civil* **8** :377–395. (Cité en pages [123](#), [125](#) et [239](#).)
- Abem (2011). ‘Formation - Acquérir et interpréter les données d’ondes de surface pour interpréter la VS30’. (Cité en page [47](#).)
- O. Abraham, et al. (1997). ‘Exemples d’utilisation des ondes de surface pour la reconnaissance d’objets du génie civil’. In *GEOFECAN*, p. 5. (Cité en page [119](#).)
- J. Adamy & E. Mouton (2002). ‘Ondes de surface aquatiques’. *AGAP* pp. 4–7. (Cité en page [34](#).)
- Afnor (1990). *P 18 553 Granulats - préparation d’un échantillon pour essai*. Commission de normalisation. (Cité en page [12](#).)
- Afnor (1992). *NF P 98-736 Matériel de construction et d’entretien des routes - Compacteurs - Classification*. Commission de normalisation. (Cité en page [206](#).)
- Afnor (1996). *NF F 53-695 Ballasts et gravillons de soufflage*. Commission de normalisation. (Cité en pages [xix](#), [9](#), [12](#), [14](#) et [19](#).)
- Afnor (1997). *NF P 94-062 - Sols : reconnaissance et essais - Mesure de la masse volumique en place - Diagraphie à double sonde*. Commission de normalisation. (Cité en page [214](#).)
- Afnor (1999). *XP P 94-011 Sols : reconnaissance et essais : description - Identification - dénomination des cols*. Commission de normalisation. (Cité en page [21](#).)
- Afnor (2000). *NF P 94-117-1 Portance des plates-formes Partie 1 : Module sous chargement statique à la plaque (EV2)*. Commission de normalisation. (Cité en page [216](#).)
- Afnor (2003). *NF EN 13-450 Granulats pour ballasts de voies ferrées*. Commission de normalisation. (Cité en pages [xi](#), [xix](#), [12](#) et [13](#).)
- Afnor (2012). *NF EN 933-3 - Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats*. Commission de normalisation. (Cité en page [14](#).)
- D. Ahlbeck, et al. (1975). ‘The development of analytical models for railroad track dynamics’. *Railroad Track Mechanics* pp. 239–263. (Cité en page [129](#).)
- Aki & Richards (1980). *Quantitative seismology - Theory and practice. 2 volumes*. (Cité en pages [70](#), [118](#) et [119](#).)

- Al Qadi,Imad L., et al. (2008). ‘Scattering analysis of ground-penetrating radar data to quantify railroad ballast contamination’. *NDT&E International* **41** :441–447. (Cité en page 19.)
- Al Shaer, Ali (2005). *Analyse des déformations permanentes des voies ferrées ballastées - approche dynamique*. Ph.D. thesis, ENPC. (Cité en pages xiv, 123, 124, 125, 129 et 239.)
- J. Alias (1977). *La voie ferrée*. Eyrolles. (Cité en page 5.)
- P. Anbazhagan, et al. (2010). ‘Using a seismic survey to measure the shear modulus of clean and fouled ballast’. *Geomechanics and Geoengineering* . (Cité en pages 26, 48, 109 et 110.)
- P. Anbazhagan, et al. (2011). ‘Model track studies on fouled ballast using ground penetrating radar and multichannel analysis of surface wave’. *Journal of Applied Geophysics* **74**(4) :175 – 184. (Cité en pages 18, 26, 48, 109, 110 et 112.)
- Andersen, et al. (2007). ‘Numerical methods for analysis of structure and ground vibration from moving loads’. *Computers & Structures* **85** :43–58. (Cité en page 121.)
- A. Arias (1970). *A measure of earthquake intensity, Seismic design for nuclear power plants*. R. J. Hansen. (Cité en page 54.)
- R. Bachrach & A. Nur (1998). ‘ElaElastic of shallow, unconsolidated sediments’. *In preparation* p. 4. (Cité en page 30.)
- Baker,Mark R., et al. (1993). ‘Seismic pavement analyser operations manual with technical specifications’. Tech. rep., SHRP. (Cité en page 33.)
- M. Barberon (2005). ‘Palas, BASil et Bacara au chevet des lignes TGV’. *Rail et Transports* pp. 19–25. (Cité en page 25.)
- Bard,Pierre-Yves, et al. (2009). ‘Caractérisation géophysique des formations superficielles du secteur la petite tronche-péage - ancien hôpital à la tronche (38700)’. Tech. rep., LGIT. (Cité en page 69.)
- Ben Slimen,Mohamed Nedim (2009). *Recherche de procédures de caractérisation de l’environnement électromagnétique ferroviaire adaptées au contexte des systèmes de communications embarqués*. Ph.D. thesis, Université des sciences et technologie de Lille. (Cité en page 23.)
- Y. Bentaleb (2007). *Analyse par ondelettes des signaux sismiques - applications aux ondes de surface*. Ph.D. thesis, Université Mohammed V. (Cité en page 33.)
- Berge,Patricia A. & Bonner,Brian P. (2002). ‘Seismic velocities contain information about depth, lithology, fluid content, and microstructure’. In L. Livermore national laboratory (ed.), *Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems*. (Cité en page 26.)

Bibliographie

- E. Berggren (2005). *Dynamic track stiffness measurement - A new tool for monitoring of track substructure*. Ph.D. thesis, KTH engineering sciences. (Cité en page 176.)
- L. Bodet (2005). *Limites théoriques et expérimentales de l'interprétation de la dispersion des ondes de Rayleigh : apport de la modélisation numérique et physique*. Ph.D. thesis, Ecole centrale de Nantes. (Cité en pages xi, 33, 34, 44 et 51.)
- L. Bodet, et al. (2005). 'Surface-wave inversion limitations from laser-doppler physical modeling'. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* **10** :9. (Cité en pages 33 et 47.)
- V. Bodin (2001). *Comportement du ballast des voies ferrées soumises à un chargement vertical et latéral*. Ph.D. thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. (Cité en pages 123, 124 et 196.)
- M. Bonnet (2010). 'Méthodes numériques rapides et inverses en propagation d'ondes élastiques ou acoustiques'. In *Séminaire LCPC*, p. 2. (Cité en page 121.)
- Borcherdt, R.D. (1970). 'Effect of local geology on ground near San Francisco Bay'. *Bull. Seism. Soc. Am.* **60** :29–61. (Cité en page 68.)
- T. Bourbié, et al. (1986). *Acoustique des milieux poreux*. Publications de l'institut français du pétrole. (Cité en pages 21, 26 et 99.)
- Y. Boussafir (2011). 'Plate-formes des voies nouvelles'. Tech. rep., Ifsttar. (Cité en page 10.)
- Brgm (2009). 'Corrélation indicateur de mouvement du sol/ intensité de l'acquisition conjointe de données instrumentales et macroscopiques'. Tech. Rep. RP-57785-FR, BRGM, Décembre. (Cité en page 54.)
- M. Broutin (2011). 'A dynamic Time-Domain analysis for Heavy Weight Deflectometers Backcalculations'. In *Airfield pavements seminar of the XXIV world road congress*. (Cité en page 124.)
- S. Brulé & E. Javelaud (2010). 'Méthode H/V appliquée aux travaux de compactage dynamique haute énergie dans le cadre de l'eurocode 8'. In *Journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur JNGG2010*, pp. 585–592. (Cité en pages 70 et 230.)
- S. Brulé, et al. (2010). 'Analyse de la réponse sismique sur un site après travaux d'amélioration des sols par compactage dynamique haute énergie'. In *Conférence franco-maghrébine en ingénierie géotechnique*, p. 16. (Cité en page 230.)
- T. Brunet (2006). *Etude de milieux granulaires secs et mouillés à l'aide des ondes ultrasonores*. Ph.D. thesis, Université de Marne La Vallée. (Cité en page 29.)
- Castagna, Gordon B., et al. (1985). 'Relationship between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks'. *Geophysics* **50**(4) :571–581. (Cité en page 27.)

- A. Cavalie (2005). ‘Propagation en milieux très hétérogènes : application à la caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec les ondes de surface’. Master’s thesis, LCPC Nantes. (Cité en page 33.)
- E. Chaljub, et al. (2007). ‘Spectral-element analysis in seismology’. In V. M. Ru-Shan Wu & R. Dmowska (eds.), *Advances in Wave Propagation in Heterogenous Earth*, vol. 48 of *Advances in Geophysics*, pp. 365 – 419. Elsevier. (Cité en page 121.)
- R. Chammas (2002). *Détermination des caractéristiques mécaniques de sols hétérogènes grâce aux ondes de surface*. Ph.D. thesis, Ecole centrale de Nantes. (Cité en pages 55 et 121.)
- D. Chapellier & J. Mari (1999). ‘Principe de base : cours online de géophysique’. Master’s thesis, Université de Lausanne. (Cité en page 27.)
- M. Chekroun, et al. (2008). ‘Diffusion multiple des ultrasons pour l’évaluation non destructive du béton avec des ondes de surface’ p. 7. (Cité en page 30.)
- P. Ciarlet (1989). *Introduction to numerical linear algebra and optimization*. Cambridge. (Cité en page 158.)
- M. Clark, et al. (2001). ‘Electromagnetic properties of railway ballast’. *{NDT} & E International* **34**(5) :305 – 311. (Cité en pages 18 et 239.)
- C. Clayton, et al. (2006). ‘Ground investigation and monitoring for track formation problems’. In G. Ghataora & M. Burrow (eds.), *Railway foundation - Applied Research and application to underpin improved railway track design and performance*, p. 22. (Cité en pages 28 et 52.)
- G. Combe (2002). ‘Chargement cycliques sur un modèle bidimensionnel de ballast de chemin de fer’. Tech. rep., LCPC SNCF. (Cité en page 124.)
- S. Corneille (2007). ‘Essais en grandeur réelle de colonnes ballastées chargées par des semelles rigides’ . (Cité en page 20.)
- J.-F. Corté, et al. (2000). *Guide Technique "Réalisation des remblais et des couches de forme"*. MELT, SETRA, LCPC. (Cité en pages 1, 57, 206, 207 et 216.)
- Cundall & Strack (1979). ‘A discrete numerical model for granular assemblies’. *Geotech* **29** :47–65. (Cité en page 127.)
- Dal Pont,S. & E. Dimnet (2008). ‘Theorical approach and numerical simulation of instantaneous collisions ingranular media using the A-CD² medthod’. *Applied mathematics and computational science* **3**(1) :1–2. (Cité en pages 114 et 153.)
- De Barros,Louis, et al. (2010). ‘Full waveform inversion of seismic waves reflected in a stratified porous medium’. *Geophys. J. Int.* p. 26. (Cité en page 30.)

Bibliographie

- De Bold,R., et al. (2007). ‘New analysis of ground penetrating radar testing of a mixed railway trackbed’ p. 17. (Cité en page 18.)
- De Bold,Robert (2011). *Non-destructive evaluation of railway trackbed ballast*. Ph.D. thesis, The university of Edinburgh. (Cité en pages xv, 26 et 177.)
- B. Derras (2011). *Contribution des données accélérométriques de KiK-Net à la prédiction du mouvement sismique par l’approche neuronale avec la prise en compte des effets de site*. Ph.D. thesis, Université Aboubekr Belkaid Tiemcen. (Cité en page 54.)
- E. Dimnet (2002). *Mouvement et collisions de solides rigides ou déformables*. Ph.D. thesis, Ecole nationale des ponts et chaussées. (Cité en pages 114, 127, 130, 153 et 154.)
- E. Dimnet, et al. (2013). ‘Experimental and numerical study of a shock-absorbing structure.’ *Acta mechanica* **224**(7) :19. (Cité en page 131.)
- J.-J. Dourthe, et al. (2009). ‘La technique ferroviaire : éléments structurants et coûts’. Formation continue de l’école des ponts, Ponts Formation Edition. (Cité en page 9.)
- S. Duloutre (2009). ‘Utilisation du bruit ambiant pour étudier les couches superficielles’ p. 8. (Cité en page 33.)
- B. Dupuy (2011). *Seismic wave Propagation in heterogeneous multiphase media : numerical modelling, sensibility and inversion of poroelastic parameters*. Ph.D. thesis, Université de Grenoble. (Cité en page 30.)
- A. Duval, et al. (2013). ‘Détection des effets de site sismiques : Mise au point de méthodes expérimentales et application à Nice’. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* . (Cité en page 33.)
- A.-M. Duval (1996). *Détermination de la réponse d’un site aux séismes à l’aide du bruit de fond - Evaluation expérimentale*. LCPC. (Cité en page 230.)
- C. Esveld (2001). *Modern railway Track*. MRT. (Cité en pages xv, 6, 123, 125, 184, 185 et 239.)
- F. Evrard (2002). ‘Prospection sismique par ondes de surface : Application à la détection de cavités souterraines’. Tech. rep., BRGM. (Cité en page 33.)
- M. Ezersky & I. Goretsky (2014). ‘Velocity-resistivity versus porosity-permeability inter-relations in Dead sea salt samples’. *Engineering Geology* p. 75. (Cité en page 27.)
- H. Fabriol, et al. (1998). ‘Application de la méthode SASW (analyse spectrale des ondes de surface) dans le district d’Annecy (France)’. (Cité en page 33.)
- M. Fateh (2005). ‘Non-destructive evaluation of railway track using ground penetrating radar’. *Research results* p. 4. (Cité en pages xv, 177 et 178.)

- C. Fauchard, et al. (2013). ‘Determination of the compaction of hot mix asphalt using high-frequency electromagnetic methods’. *{NDT} & E International* **60**(0) :40 – 51. (Cité en page 18.)
- Federal Railroad Administration, (1977). ‘Material evaluation study, ballast and foundation materials research program’. Tech. rep., US Department of transportation. (Cité en page 20.)
- V. Ferber & O. Abraham (2002). ‘Apport des méthodes sismiques pour la détermination des modules élastiques initiaux : application au site expérimental de Merville’. *PARAM* p. 8. (Cité en page 33.)
- J. Fernandez, et al. (2011). ‘Spectral-analysis-surface-waves-method in ground characterization’. *Engineering procedia* **10** :3202–3207. (Cité en page 40.)
- M. Forde, et al. (1999). ‘EPSRC : NDT to determine stiffness and fouling of ballast and trackbed on high speed rail alignments’. (Cité en page 26.)
- G. Foret, et al. (2003). ‘Vibration du ballast ferroviaire - une étude expérimentale à échelle réduite’. *Revue Française de Génie Civil* **7** :777–795. (Cité en pages 12, 25 et 193.)
- E. Fortunato (2005). *Renocacao de plataformas ferroviarias. Estudos relativos a capacidade de carga*. Ph.D. thesis, FEUP Porto. (Cité en pages 124, 125 et 239.)
- S. Foti (2000). *Multistation methods for geotechnical characterization using surface waves*. Ph.D. thesis, Ecole polytechnique de Torino. (Cité en pages xi, 42 et 48.)
- M. Frémond (1995). ‘Rigid bodies collisions’. *Phys. Lett. A*. **204** :33–41. (Cité en pages 154 et 155.)
- G. Gallagher, et al. (1999). ‘The application of time domain ground penetrating radar to evaluate railway track ballast’. *{NDT} & E International* **32**(8) :463 – 468. (Cité en pages 18 et 26.)
- P. Galvin & J. Dominguez (2008). ‘A coupled BEM/FEM model for HST induced vibrations’. *Noise and Vibration on High-Speed Railways* p. 20. (Cité en pages 123, 125, 148 et 239.)
- G. Gardner, et al. (1974). ‘Formation velocity and density - the diagnostic basics for stratigraphic traps’. *Geophysics* **39**(6) :770–780. (Cité en page 26.)
- P.-E. Gautier (2009). ‘Problèmes actuels en mécanique dans le domaine ferroviaire : vers l’omniprésence du non linéaire et du stochastique’ p. 12. (Cité en page 130.)
- P.-E. Gautier, et al. (2008). ‘Pass-by external noise from TGV’s : measurements and source models up to 360 km/h’. *Noise and Vibration on High-Speed Railways* p. 12. (Cité en page 130.)

Bibliographie

- C. Gelis (2005). *Inversion des formes d'onde élastique dans le domaine espace-fréquence en deux dimensions. Application à la caractérisation de la subsurface dans le cadre de la détection de cavités souterraines*. Ph.D. thesis, Université de Nice-Sophia Antipolis. (Cité en page 34.)
- Glangeaud & al (1999). *Technique du signal pour géologues et géophysiciens*. Publications de l'institut français du pétrole. (Cité en page 34.)
- P. Gouedard (2008). *Techniques de corrélation : aspects méthodologiques et applications à la sub-surface*. Ph.D. thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble 1. (Cité en pages 33 et 76.)
- G. Grandjean, et al. (2001). 'Détection de cavités souterraines par ondes de surface à Châlons-en-champagne (Marne)'. Tech. rep., BRGM. (Cité en page 33.)
- Griboulet (2006). 'Maintenance de la géométrie des lignes à grande vitesse - expérience de la SNCF'. Tech. rep., SNCF. (Cité en page 25.)
- N. Gucunski & A. Maher (2002). 'Evaluation of seismic pavement analyzer for pavement condition monitoring'. Tech. rep., New jersey department of transportation. (Cité en page 33.)
- D. Gunn, et al. (2006). 'Assessment of railway embankment stiffness using continuous surface waves'. In G. Ghataora & M. Burrow (eds.), *Railway foundation - Applied Research and application to underpin improved railway track design and performance*, p. 13. (Cité en page 28.)
- N. Guérin (1996). *Approche expérimentale et numérique du comportement du ballast des voies ferrées*. Ph.D. thesis, Ecole nationale des ponts et chaussées. (Cité en pages 20, 25, 125, 130, 195, 196, 198 et 239.)
- B. Hardin, et al. (1994). 'Resonant column testing at pressures up to 3.5MPa (500 psi)'. *Dynamic geotechnical testing II ASTM STP 1(222)* :33. (Cité en page 137.)
- Haskell (1960). 'Crustal reflection of plane SH waves'. *Journal of Geophysical Research* **65** :4147–4450. (Cité en page 70.)
- W. A. Haupt (1977). 'Surface-waves in non-homogeneous half space'. *DMSR* **1** :335–367. (Cité en page 33.)
- Heisey & Meyer (1982). 'Moduli pavements systems from spectral analysis of surface waves'. *Transp. Res. Rec.* **852** :22–31. (Cité en pages xix, 48, 68 et 119.)
- H. L. V. Helmholtz (1858). 'Über integrale der hydrodynamischen gleichungen, welche den wirbelbewegungen entsprechen'. *Journal für die reine und angewandte Mathematik* **55** :25–55. (Cité en pages 37 et 42.)

- H. Herrmann & S. Luding (1998). ‘Modeling granular media on the computer’. *Review article* p. 47. (Cité en page 129.)
- Hertz (1882). ‘On the contact of elastic solids’. *J. reine und angewandte mathematik* **92** :156–171. (Cité en page 127.)
- A. Hettler (1987). ‘Schotter Triaxialversuche mit statischen und zyklischen Belastungsverlauf’. *Eisenbahntechnische Rundschau* . (Cité en page 195.)
- M. Hosseingholian (2007). *Etude d’une méthode d’auscultation dynamique de la structure des voies ferrées classiques*. Ph.D. thesis, Université de Caen. (Cité en page 176.)
- H. Huang (2010). *Discrete element modeling of railroad ballast using imaging based aggregate morphology characterization*. Ph.D. thesis, University of illinois at Urbana Champaign. (Cité en pages xv, 158 et 159.)
- H. Huang & S. Chrismer (2013). ‘Discrete element modeling of ballast settlement under trains moving at Critical Speed’. *Construction and Building Materials* **38**(0) :994 – 1000. 25th Anniversary Session for {ACI} 228 “ Building on the Past for the Future of {NDT} of Concrete. (Cité en page 29.)
- G. Huillard (2011). *Propagation d’ondes sonores dans des empilements granulaires non cohésifs*. Ph.D. thesis, Université de Nice Sophia Antipolis. (Cité en page 125.)
- Humbert, et al. (2005). ‘Cesar LCPC un progiciel de calcul dédié au génie civil’. *articleBLPC* . (Cité en pages 143 et 144.)
- H.-J. Hwang & H.-C. Park (2014). ‘Evaluation of condition of gravel ballast layer on high-speed railway using surface wave method based on harmonic wavelet analysis of waves’. *{NDT} & E International* **68**(0) :78 – 87. (Cité en pages 2, 28 et 109.)
- D. Imbert (2013). *Propagation d’ondes acoustiques dans une suspension de grains mobiles immergés : couplage de modèles discret et continu par la méthode des domaines fictifs*. Ph.D. thesis, Institut de physique de Rennes. (Cité en page 29.)
- B. Indraratna, et al. (2011). ‘A new parameter for classification and evaluation of railway ballast fouling’. *Canadian geotechnical journal* **48** :322–326. (Cité en page 17.)
- Infrabel (2007). *Spécifications techniques L11 Ballasts et gravillons de la voie*. (Cité en page 14.)
- Innogeo (2013). ‘Essai cross-hole et down-hole détermination des paramètres géodynamiques du sous-sol’. (Cité en page 33.)
- D. Jacqueline, et al. (2015). ‘Measurement and numerical modeling of the propagation of impact vibrations through a ballast layer’. *Soils mechanichs* p. 19. (Cité en page 153.)

Bibliographie

- M. Jean (1999). ‘The non-smooth contact dynamic method’. *Methods Appl. Mech. Eng.* **177**(3-4) :235–257. (Cité en pages [127](#) et [153](#).)
- M. Jean & J. Moreau (1992). ‘Unilaterality and dry friction in the dynamics of rigid body collections’. In *Contact mechanics International symposium*, pp. 31–48. (Cité en pages [127](#) et [130](#).)
- D. Johnson, et al. (2000). ‘Nonlinear elasticity of granular media’. *Physica B - Condensed Matter* **279**(13) :134 – 138. (Cité en page [126](#).)
- P. Joly (1982). ‘Les ondes de Rayleigh numériques’. Tech. rep., IRIA (institut de recherche en informatique et en automatique). (Cité en page [121](#).)
- S. Kaewunruen & A. Remennikov (2005a). ‘Integrated field measurements and track simulations for condition assessment of railway track’. *Research online* p. 9. (Cité en page [239](#).)
- S. Kaewunruen & A. Remennikov (2005b). ‘Monitoring structural degradation of rail pads in laboratory using impact excitation technique’. *Research online* p. 7. (Cité en page [239](#).)
- S. Kaewunruen & A. Remennikov (2006). ‘Non destructive testing (NDT) : A tool for dynamic health monitoring of railway track structures’. *Research online* p. 7. (Cité en pages [125](#) et [239](#).)
- A. Karrech (2007). *Comportement des matériaux granulaire sous vibration : application au cas du ballast*. Ph.D. thesis, Ecole nationale des ponts et chaussées. (Cité en page [130](#).)
- M. Kham (2004). *Propagation d’ondes sismiques dans les bassins sédimentaires : des effets de site à l’interaction site-ville*. Ph.D. thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. (Cité en pages [69](#), [76](#), [116](#) et [117](#).)
- M. A. Knackstedt, et al. (2005). ‘Velocity-porosity relationships : Predictive velocity model for cemented sands composed of multiple mineral phases’. *Geophysical Prospecting* pp. 349–372. (Cité en page [27](#).)
- K. Knothe & S. Grassie (1993). ‘Modelling of rail track and vehicle/track interaction at high frequencies’. *Vehicle system dynamics* **22** :209–262. (Cité en page [129](#).)
- L. Kouame, et al. (2011). ‘Relations vitesse sismique - propriétés pétrophysiques des terrains sédimentaires dans la marge continentale de Côte d’Ivoire’. *Geo-Eco-Trop* **35** :9–22. (Cité en page [27](#).)
- G. Kouroussis (2009). *Modélisation des effets vibratoires du trafic ferroviaire sur l’environnement*. Ph.D. thesis, Faculté polytechnique de Mons. (Cité en pages [xi](#), [6](#), [20](#), [124](#), [125](#), [129](#) et [239](#).)
- Lacoss, et al. (1969). ‘Estimation of seismic noise using arrays’. *Geophysics* **34** :21. (Cité en page [49](#).)

- H. Lam & M. Wong (2011). ‘Railway Ballast Diagnose through Impact Hammer Test’. *Procedia Engineering* **14**(0) :185 – 194. The Proceedings of the Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction {EASEC12}. (Cité en page 29.)
- H. Lam, et al. (2012). ‘A feasibility study on railway ballast damage detection utilizing measured vibration of in situ concrete sleeper’. *Engineering Structures* **45**(0) :284 – 298. (Cité en pages 2 et 29.)
- U. Lamalle (1951). ‘Cours d’exploitation des chemins de fer Tome III LA VOIE Fascicule I : le ballast, les traverses, les rails, les appareils de voie, virage et translation’. (Cité en pages xv et 189.)
- H. Lamb (1904). ‘On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid.’. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **203** :46. (Cité en page 43.)
- E. Larose (2006). ‘Mesoscopics of ultrasound and seismic waves : application to passive imaging’. *Ann. Phys.* **3** :126. (Cité en pages 34, 76, 171 et 234.)
- Lavergne (1986). *Méthodes sismiques*. (Cité en pages 33 et 99.)
- M. Lecheheb (2010). *Modélisation analytique d’un rail sur appui continu : analyse paramétrique*. Ph.D. thesis, Université Mentouri Constantine. (Cité en page 130.)
- Legonidec & Gibert (2007). ‘Multiscale analysis of waves reflected by granular media : acoustic experiment on glass beads and effective medium theories’. *Journal of Geophysical Research Solid Earth* . (Cité en page 29.)
- C. Leonard, et al. (1998). ‘Outils d’aide à la résolution du problème inverse pose par la détection des cavités peu profondes’. *XVIe rencontre de l’association universitaire de génie civil* p. 7. (Cité en page 33.)
- D. Leparoux, et al. (2002). ‘Détection des cavités souterraines par ondes sismiques de surface le long de lignes TGV. Expérimentation sur un site test’. *AGAP* . (Cité en page 33.)
- D. Leparoux, et al. (2010). ‘Caractérisation de l’EDZ (Excavation Damaged Zone) par méthodes sismiques et ultrasoniques’. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l’Ingénieur JNGG2010* :811–818. (Cité en page 33.)
- Z. Li, et al. (2013). ‘Using centrifuge tests data to identify the dynamic soil properties : Application to Fontainebleau sand’. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **52** :77–87. (Cité en page 137.)
- R. Madec (2010). *Méthode des éléments spectraux pour la propagation d’ondes sismiques en milieu géologique fluide-solide avec pas de temps locaux et couches absorbantes parfaitement adaptées C-PML*. Ph.D. thesis, Université de Pau et des Pays de l’Adour. (Cité en page 150.)

Bibliographie

- O. Magnin & Y. Bertrand (2005). *Guide sismique réfraction*. LCPC. (Cité en pages [xi](#), [33](#), [39](#) et [84](#).)
- H. Makse, et al. (2000). ‘Packing of compressible granular aterials’. *Physical Review Letters* **84** :4160–4163. (Cité en pages [xiv](#) et [126](#).)
- M. Maldonado (2008). *Vibrations dues au passage d’un tramway : mesures expérimentales et simulations numériques*. Ph.D. thesis, Ecole centrale de Nantes. (Cité en pages [116](#), [119](#) et [121](#).)
- L. Margerin, et al. (1998). ‘Radiative transfer and diffusion of waves in a layered medium : new insight into coda Q.’. *Geophys. J. Int.* **134**(2) :596–612. (Cité en pages [30](#) et [76](#).)
- Mari, et al. (1998). *Géophysique et gisement en génie civil La sismique réflexion - utilisation des ondes de surface*, chap. 4, pp. 97–131. (Cité en pages [33](#), [47](#), [51](#), [58](#) et [81](#).)
- J. Mari, et al. (1997). *Traitement du signal pour géologues et géophysiciens*. Institut français du pétrole. (Cité en pages [xi](#), [34](#), [37](#), [40](#), [51](#) et [112](#).)
- A. Martin (2014). *Analyse numérique de la réponse dynamique de structures ferroviaires. Application à la réduction des désordres géométriques induits dans les couches de ballast des lignes à grande vitesse*. Ph.D. thesis, Ecole Centrale de Nantes. (Cité en pages [114](#) et [144](#).)
- Meier Hirmer, Carolina (2009). ‘Optimisation de la maintenance de la géométrie de la voie’. Tech. rep., SNCF. (Cité en pages [xv](#), [25](#) et [174](#).)
- O. Meric (2006). *Etude des mouvements de terrain par méthodes géophysiques*. Ph.D. thesis, Université Joseph Fourier de Grenoble. (Cité en page [69](#).)
- Meza Fajardo, Kristel, et al. (2014). ‘Modeling seismic surface waves through time-frequency analysis and group delay spectrum’. *Eurodyn* p. 8. (Cité en pages [33](#), [34](#) et [51](#).)
- A. Miksic (2008). *Etude des propriétés mécaniques et acoustiques d’un milieu granulaire sous chargements cycliques*. Ph.D. thesis, Université Pars Est. (Cité en page [125](#).)
- G. Miller & H. Pursey (1955). ‘On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid’ pp. 55–69. (Cité en pages [xix](#) et [42](#).)
- P. Moczo, et al. (2007). ‘The Finite-Difference Time-Domain Method for Modeling of Seismic Wave Propagation’. In V. M. Ru-Shan Wu & R. Dmowska (eds.), *Advances in Wave Propagation in Heterogenous Earth*, vol. 48 of *Advances in Geophysics*, pp. 421 – 516. Elsevier. (Cité en page [121](#).)
- J. Moreau (1966). ‘Fonctionnelles convexes, séminaire sur les équations aux dérivés partielles’. *Journal de la mécanique* n°4 **4**. (Cité en pages [127](#) et [155](#).)

- Nazarian & Stokoe (1984). ‘In situ shear wave velocity from spectral analysis of surface waves’. *Proc. 8th Conf. on Earthquake Eng - S. Francisco* **3** :31–38. (Cité en page 48.)
- S. Nebieridze (2009). ‘Jotrain CFMS - L’apport de la géophysique à la géotechnique - l’expérience de la station d’essai géophysique sur le LGV Nord’. (Cité en page 33.)
- M.-Q. Nguyen (2000). *Analyse multi-dimensionnelle et analyse par les ondelettes des signaux sismiques*. Ph.D. thesis, INPG Institut national polytechnique de Grenoble. (Cité en page 34.)
- T. L. Nguyen (2008). *Etude expérimentale de la loi d’écoulement de matériaux anisotropes transverses*. Ph.D. thesis, Ecole nationale des Ponts et Chaussées. (Cité en pages xiv et 117.)
- V. H. Nguyen (2002). *Comportement dynamique de structures non-linéaires soumises à des charges mobiles*. Ph.D. thesis, ENPC. (Cité en pages 124, 125, 150 et 239.)
- D. Nkemzi (1997). ‘A new formula for the velocity of Rayleigh waves’. *Wave motion* **26** :199–205. (Cité en page 43.)
- O’neills (2004). ‘Shear wave velocity model appraisal in shallow surface wave inversion’. In *ISC-2 on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, pp. 539–546. Millpress, A. Viana de Fonseca and P. W. Mayne. (Cité en page 48.)
- Oviedo Marlot, (2001). *Etude du comportement du ballast par un modèle micromécanique*. Ph.D. thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. (Cité en page 130.)
- C. Paderno (2010). *Comportement du ballast sous l’action du bourrage et du trafic ferroviaire*. Ph.D. thesis, EPFL Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne. (Cité en pages 21, 25, 124, 125 et 239.)
- Park, et al. (2001). ‘Seismic investigation of pavements by MASW method - geophone approach’. *Kansas Geological survey* p. 9. (Cité en pages xi, 50 et 56.)
- Park, et al. (1997). ‘Summary Report on Surface-Wave Project’. Tech. rep., Kansas Geological Survey (KGS). (Cité en pages 48 et 56.)
- Park, et al. (2007). ‘Multichannel analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods’. *The leading edge* **26** :60–64. (Cité en pages xi, xii, 52, 53 et 56.)
- Payeur, et al. (2013). ‘Modélisation d’échantillons numérique de sol armé sous sollicitations dynamiques’. *21ième congrès français de mécanique*. (Cité en pages 123, 125 et 239.)
- S. D. Poisson (1811). *Traité de mécanique*. (Cité en page 34.)
- Pérez Santisteban, Itziar, et al. (2011). ‘Comparison among SASW, ReMi and PS-logging techniques : Application to a railway embankment’. *Journal of Applied Geophysics* **73**(1) :59 – 64. (Cité en page 28.)

Bibliographie

- V. Profillidis (1983). *La voie ferrée et sa fondation - modélisation mathématique*. Ph.D. thesis, ENPC. (Cité en pages 24 et 195.)
- J. C. Quezada (2014). *Mécanismes de tassement du ballast et sa variabilité*. Ph.D. thesis, Université Montpellier 2. (Cité en pages 1 et 26.)
- P. Rasolofosaon, et al. (1983). ‘Reconnaissance de formations par étude fréquentielle de signaux sismiques’. *Bulletin de l’association internationale de géologie de l’ingénieur* **26-27** :285–293. (Cité en page 34.)
- L. J. W. S. Rayleigh (1885). ‘On waves propagated along the plane surface of an elastic solid’. In *London Math. Soc.*, vol. 17, pp. 4–11. (Cité en page 40.)
- F. Renalier (2010). *Caractérisation sismique de sites hétérogènes à partir de méthodes actives et passives : variations latérales et temporelles*. Ph.D. thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble I. (Cité en pages 33 et 34.)
- E. Rey (2005). *Caractérisation de sols hétérogènes par des méthodes géophysiques*. Ph.D. thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble 1. (Cité en page 33.)
- L. Ricci, et al. (2005). ‘Dynamic behaviour of ballasted railway tracks : A discrete/continuous approach’. *Computers & Structures* **83**(28–30) :2282 – 2292. A Selection of Papers from Civil-Comp 2003 and AlCivil-Comp 2003. (Cité en pages xiv, 115, 116 et 129.)
- R. Roberts, et al. (2006). ‘Railroad ballast fouling detection using Ground penetrating radar - A new approach based on scattering from voids’. *ECNDT* p. 8. (Cité en pages 19 et 26.)
- A. Romdhane, et al. (2007). ‘Modélisation sismique 2D : Limitations des modèles conventionnels’. *GEOFCAN* p. 4. (Cité en page 33.)
- A. Roueff (2003). *Traitement des signaux sismiques multicapteurs et multicomposantes, utilisant les représentations temps-fréquence*. Ph.D. thesis, Institut national polytechnique de Grenoble. (Cité en pages 34, 51 et 71.)
- A. Roueff, et al. (2001). ‘Séparation d’ondes sismiques par ligne de partage des eaux sur des images Temps-Echelle’. *GRETSI*. (Cité en page 34.)
- D. SaintLaurent (2008). ‘Synthèse des outils de modélisation de chaussée actuellement disponibles au LCPC’. Tech. rep., LCPC. (Cité en pages xiv, 113, 114 et 124.)
- G. Saussine (2004). *Contribution à la modélisation de granulats tridimensionnels : application au ballast*. Ph.D. thesis, Université de Montpellier II. (Cité en pages 115, 124, 129 et 130.)
- L. Schmitt, et al. (2006). ‘Dégradation de la voie ferrée ballastée sous sollicitations cycliques’. (Cité en pages xi et 24.)

- E. Selig & J. Waters (1994). *Track geotechnology and substructure management*. Thomas Telford. (Cité en pages [xi](#), [1](#), [12](#), [14](#), [15](#), [17](#), [21](#), [22](#), [23](#), [176](#) et [239](#).)
- J. Semblat & A. Pecker (2009). *Waves and Vibrations in Soils : Earthquakes, Traffic, Shocks, Construction Works*. IUSS Press. (Cité en pages [xiv](#), [34](#), [53](#), [118](#) et [121](#).)
- J.-F. Semblat (1997). ‘Rheological interpretation of rayleigh damping’. *Journal of Sound and Vibration* **206** :741–744. (Cité en page [120](#).)
- J.-F. Semblat (2008). ‘Modeling seismic wave propagation in 1D/2D/3D linear and nonlinear media’. In *12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*. (Cité en pages [xiv](#) et [122](#).)
- J.-F. Semblat & J. Brioist (2000). ‘Efficiency of higher order finite elements for the analysis of seismic wave propagation’. *Journal of Sound and Vibration* **231** :460–467. (Cité en pages [121](#) et [122](#).)
- J.-F. Semblat & P. Dangla (2005). ‘Modélisation de la propagation d’ondes et de l’interaction sol-structure : approches par éléments finis et éléments de frontière’. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées* **256** :163–178. (Cité en page [121](#).)
- J.-F. Semblat, et al. (2010). ‘A simple numerical absorbing layer method in elastodynamics’. *Comptes Rendus Mecanique* **338** :24–32. (Cité en pages [122](#) et [150](#).)
- J.-F. Semblat, et al. (2011). ‘A simple multi-directional absorbing layer method to simulate elastic wave propagation in unbounded domains’. *International journal for numerical methods in engineering* **85** :1543–1563. (Cité en pages [123](#), [148](#) et [150](#).)
- M. Shenton (1978). ‘Deformation of railway ballast under repeated loading conditions’. *Pergamon press* . (Cité en page [195](#).)
- Sheriff & Geldart (1995). *Exploration Seismology*. Cambridge University Press. (Cité en pages [xi](#) et [46](#).)
- S. Signorini (1933). ‘Sopra alcune questioni di elastostatica.’. In *Atti della Societa Italiana per il Progresso delle Scienze*, p. 40. (Cité en page [127](#).)
- Sncf (1985). *Notice générale XP P 15-545 - article 12*. (Cité en page [202](#).)
- Sncf (1999). ‘ST590B - Spécification technique pour la fourniture des granulats utilisés pour la réalisation et l’entretien des voies ferrées.’. Tech. rep. (Cité en pages [10](#), [12](#) et [202](#).)
- Sptf (2009). *Guide pour la réalisation des terrassements des plateformes de bâtiments et d’aires industrielles dans le cas de sols sensibles à l’eau*. (Cité en page [10](#).)
- T. Stark, et al. (2013). ‘Seismic testing for track substructure (ballast and subgrade) assessment for passenger/freight corridors’. (Cité en pages [2](#) et [28](#).)

Bibliographie

- Stokoe, et al. (1994). *Geophysical characterization of sites*, chap. Characterization of sites by SASW method, pp. 15–25. ISSMFE Technical Committee10, A. A. Balkema. (Cité en page 48.)
- J. Suffert, et al. (2006). ‘Etude d’une cavité saline par méthodes sismiques’. Master’s thesis, Ecole de Physique du Globe de Strasbourg. (Cité en page 33.)
- A. Suiker, et al. (2005). ‘Static and cyclic triaxial testing of ballast and subballast’. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **131**(6) :771–782. (Cité en page 129.)
- Y. Sun & M. Dhanasekar (2000). ‘A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system’. *International Journal of Solids and Structures* **39**(5) :1337 – 1359. (Cité en pages 124, 125 et 239.)
- Q.-A. Ta, et al. (2007). ‘Inversion de la variabilité horizontale du sol par analyse des ondes de surface’ p. 6. (Cité en page 33.)
- F. Tatsuoka, et al. (1978). ‘Hysteretic damping of sands under cyclic loading and its relation to shear modulus’. *Soils and Foundations* **18** :25–40. (Cité en page 137.)
- W. Telford, et al. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge University Press. (Cité en page 33.)
- Tokimatsu, et al. (1991). ‘Vs determination from steady state Rayleigh Wave method’. *Soils and Foundations* **31** :153–163. Jap. Soc. Soil Mech. (Cité en pages xix et 68.)
- V. N. Trinh (2011). *Comportement hyrdomécanique de matériaux constitutifs de plateformes ferroviaires anciennes*. Ph.D. thesis, Université Paris Est. (Cité en page 24.)
- I. Viktorov (1965). ‘Rayleigh and Lamb waves : physical theory applications.’. *Plenum press New tork* . (Cité en pages 43 et 112.)
- M. Wathelet (2005). *Geopsy*. ISTerre, Maison des geosciences 1381, rue de la piscine BP 53 38041 Grenoble cedex 1. Projet européen SESAME. (Cité en page 99.)
- M. Wathelet, et al. (2007). ‘Mesure et inversion de l’ellipticité des ondes de surface : amélioration des méthodes de type MASW’. *6ième colloque GEOFCAN* p. 4. (Cité en page 51.)
- M. Wathelet, et al. (2005). ‘Recommendations for quality array measurements and processing’. Tech. rep., LGIT. (Cité en page 70.)
- I. wha Lee, et al. (2006). ‘Spectral analysis of surface waves technique for measuring the dynamic stiffness profile of railway roadbed’. In G. Ghataora & M. Burrow (eds.), *Railway foundation - Applied Research and application to underpin improved railway track design and performance*, p. 12. (Cité en page 28.)
- R. D. Woods (1968). ‘Screening of surface waves in soils’. Tech. rep., Université du michigan. (Cité en pages xii, 33 et 54.)

- J. Xia, et al. (1999). ‘Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves’. *Geophysics* **64** :691–700. (Cité en page 40.)
- J. Xia, et al. (2000). ‘Multichannel analysis of applications - Theory and applications’. Tech. rep., KGS. (Cité en page 47.)
- M. Zagyapan & C. Fairfield (2002). ‘Continuous surface wave and impact methods of measuring the stiffness and density of railway ballast’. *{NDT} & E International* **35**(2) :75 – 81. (Cité en pages 2, 27, 109 et 110.)
- A. M. Zarembski & G. R. Newmani (2008). ‘Comparative technical and economic analysis of stoneblowing vs. tamping’ p. 32. (Cité en pages xv, xvi, 12, 25, 189, 190 et 191.)
- Zhai, et al. (2004). ‘Modelling and experiment of railway ballast vibrations’. *Journal of Sound and Vibration* **270** :673 – 683. (Cité en pages 20, 123, 125 et 239.)
- B. Zinszner, et al. (2002). ‘Vitesse des ondes ultrasonores, soniques et sismiques dans les argilites du tunnel de Tournemire. Effet de l’anisotropie et de la fracturation naturelle’. *Oil & gas science and technology* **57** :341–353. (Cité en page 33.)